

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky



Fotovoltaický ohřev teplé vody v rodinném domě
Photovoltaic hot water production in households

2019

Michael Dvořák

Zadání bakalářské práce

Student: **Michael Dvořák**
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **3907R001 Elektroenergetika**
Téma: **Fotovoltaický ohřev teplé vody v rodinném domě**
Photovoltaic hot water production in households
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Teorie a principy fotovoltaického ohřevu teplé vody
Komerčně dostupná zařízení pro ohřev teplé vody
Vyhodnocení měření fotovoltaického ohřevu teplé vody včetně dohřevu z distribuční sítě

Seznam doporučené odborné literatury:

MIŠÁK, Stanislav a Lukáš PROKOP. Provozní vlastnosti obnovitelných zdrojů. Ostrava: Asociace technických diagnostiků ČR, o.s., 2014. ISBN 978-80-260-6184-7.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 29.4.2019



podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Tadeuszi Sikorovi, Ph.D. za cenné rady, odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Rovněž děkuji za poskytnutá data a pomoc při jejich zpracování.

Abstrakt

Práce se zabývá principem, fungováním a především návratností fotovoltaického systému, který je uzpůsoben pro ohřev teplé vody v domácnostech. Tento systém má předpoklady, aby nahradil stávající způsoby ohřevu, jelikož je závislý na el. síti převážně pouze v zimních měsících. Jeho fotovoltaická část je v základu tvořena z fotovoltaických panelů, jejichž energie se přes regulátor dostává na spirálu ohřívače vody. Nejdříve je popsána funkčnost systému, následně jsou pomocí dat provedeny výpočty, pomocí kterých jsou zpracovány důležité informace o funkčnosti jak v letním, tak v zimním období z celého roku. Ve shrnutí jsou data analyzována a je z nich vypočtena návratnost. Závěrem jsou dodány další poznatky, které by dle mého názoru měly tento systém ještě zlepšit.

Klíčová slova

Alternativní zdroje, fotovoltaika, bojler, regulátor, ohřev.

Abstract

The thesis deals with the principle, operation and above all the payback of the photovoltaic system, which is adapted for heating of domestic hot water. This system is supposed to replace the existing heating methods because it is dependent on electricity mainly in the winter months. Its photovoltaic part is basically made of photovoltaic panels, whose energy through the regulator gets to the spiral of the water heater. First is described the functionality of the system, then the calculations are made using the data, which are used to process important information about the functionality both in summer and in winter from the whole year. In summary, the data is analyzed and the return is calculated. In conclusion, there are other findings that I think should improve this system.

Key words

Alternative sources, photovoltaics, boiler, regulator, heating.

Obsah práce:

Seznam použitých symbolů	8
Seznam použitých zkratk.....	10
Seznam ilustrací a seznam tabulek	11
1 Úvod	13
2 Fotovoltaické panely	14
2.1 Slunce jako zdroj energie, rozložení solární využitelnosti v ČR.....	15
2.2 Energie ze slunečního světla	17
2.3 Solární článek.....	21
2.3.1 První typ fotovoltaického článku – monokrystalické články	23
2.3.2 Druhý typ fotovoltaického článku – polykrystalické články.....	24
2.3.3 Třetí typ fotovoltaického článku – amorfni křemíkové články	25
2.4 Detekce vad u FV panelů	26
3 Další periferie systému	28
3.1 MPPT regulátor	28
3.2 Bojler se dvojí možností napájení	30
3.3 Povely HDO	31
4 Popis komplexní funkce systému.....	35
4.1 Popis měřeného objektu	35
5 Komerčně dostupná zařízení, možnost dotací.....	37
6 Rozbor dat	39
6.1 Doba využití FV / odběru ze sítě.....	39
6.2 Náklady, možná finanční návratnost.....	46
7 Shrnutí a závěr	47
8 Seznam literatury a webových stránek.....	48

Seznam použitých symbolů

Symbol	jednotky	význam symbolu
U	V	napětí (obecně)
U_1	V	napětí vyrobené FV panelem (před MPPT regulátorem)
U_2	V	napětí vyrobené FV panelem (za MPPT regulátorem)
U_4	V	napětí odebrané ze sítě (HDO)
I	A	proud (obecně)
I_1	A	proud vyrobený FV panelem (před MPPT regulátorem)
I_2	A	proud vyrobený FV panelem (za MPPT regulátorem)
I_4	A	proud odebraný ze sítě (HDO)
P	W	výkon (obecně)
P_1	W	výkon odebraný z FV systému (před MPPT regulátorem)
P_2	W	výkon odebíraný z FV systému (za MPPT regulátorem)
P_4	W	výkon odebraný ze sítě (HDO)
P_m	Wp	údaj o výkonu FV panelu (max;peak)
V_{U4}	%	napětí U_4 (ze sítě) k dispozici, HDO v sepnutém stavu
V_{P4}	%	využití skutečného sepnutí HDO ku jeho využití
λ	nm, μm	vlnová délka
f	Hz	frekvence
T	s	perioda
t	s, min, h, den	čas

Symbol	jednotky	význam symbolu
<i>E</i>	W/m ²	úhrn energie slunečního záření
<i>U_{mpp}</i>	V	napětí, max. peak - peak
<i>I_{mpp}</i>	A	proud, max. peak - peak
<i>P_{mpp}</i>	Wp	výkon, max. peak - peak

Seznam použitých zkratk

Zkratka	význam
FV	fotovoltaika, fotovoltaický
MPPT	maximum power point tracking
OZE	obnovitelné zdroje energie
HDO	hromadné dálkové ovládání
RD	rodinný dům
VT	vysoký tarif
NT	nízký tarif
TUV	teplá užitková voda
DPH	daň z přidané hodnoty
DC	stejnosměrné (napětí, proud, výkon)
AC	střídavé (napětí, proud, výkon)
ČEPS	česká energetická přenosová soustava
N	typ polovodiče – převaha elektronů; N = negativní
P	typ polovodiče – převaha děr; P = pozitivní
IR	infračervené záření
UV	ultrafialové záření
PWM	pulsně šířková modulace

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Seznam grafů:

Graf 1 Graf naměřených hodnot napětí na diodě v závislosti na úrovni osvětlení světelným zdrojem	20
Graf 2 Celková bilance toku energie v FV článku	21
Graf 3 Příklad funkčnosti MPPT regulátoru (Zdroj: mojefotovoltaika.cz)	28
Graf 4 Znázornění skutečného stavu denní aktivity HDO	32
Graf 5 Měření teploty měřicího modulu DC	36
Graf 6 Roční bilance FV systému	40
Graf 7 Znázornění roční bilance energie pro ohřev vody v jednotlivých měsících	41
Graf 8 Znázornění bilance energie v jednotlivých týdnech	42
Graf 9 Znázornění závislosti výroby FV na denní hodině	42
Graf 10 Závislost denní výroby na čase – srovnání lednové a květnové výroby energie	43
Graf 11, 12, 13 Průběhy napětí, proudu a výkonu z datumu 22.7.2018.....	44

Seznam obrázků:

Obrázek 1 Bilance instalovaného výkonu v rámci ČR k roku 2016 (zdroj: oze.tzb-info.cz).....	14
Obrázek 2 Mapa slunečního záření na území ČR (zdroj: isofenergy.cz)	15
Obrázek 3 Umístění Havířova na mapě ČR (zdroj: kurzy.cz)	16
Obrázek 4 Ilustrační princip funkce PN přechodu ve FV panelu (zdroj: cez.cz)	17
Obrázek 5 Demonstrace fotoelektrického jevu (zdroj: cs.wikipedia.org)	18
Obrázek 6 Závislost vlnové délky na počtu fotonů (zdroj: isolar.cz).....	19
Obrázek 7 Schéma zapojení experimentu	19
Obrázek 8 Demonstrace výroby monokrystalického křemíku (zdroj: www.top-alternative-energy-sources.com).....	23
Obrázek 9 Vizuální odlišnost polykrystalického (vlevo) a monokrystalického článku (vpravo)	24
Obrázek 10 Vyobrazení různých krystalických struktur křemíkových vazeb. Zleva monokrystalická (A), dále polykrystalická (B) a amorfni (C). (Zdroj: en. Wikipedia.org)	25
Obrázek 11 Vypálený FV článek (Zdroj: oze.tzb-info.cz)	26
Obrázek 12 šnečí cestičky	26
Obrázek 13 Snímek termovizní kontroly FV panelů (zdroj: solarnidiagnostika.cz).....	27
Obrázek 14 Jednoduché zapojení základních komponentů.....	30
Obrázek 15 Orientační časy oznamující spínání jednotlivých povelů HDO (Zdroj: cez.cz)	31
Obrázek 16 Schématické znázornění bojleru pro případ dohřevu ze sítě	32
Obrázek 17 Bilance energie v síti (Zdroj: ceps.cz)	33
Obrázek 18 Náklon FV panelů v zimních měsících.....	36
Obrázek 19 Schéma FV části výroby energie (Zdroj: firma Kelins, upraveno).....	39
Obrázek 20 Znázornění garantovaného výkonu FV panelů vyrobených firmou Axitec Solar (zdroj: axitecsolar.cz).....	40

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Význam jednotlivých bodů	21
Tabulka 2 Suma ze všech měsíčních hodnot	41

1 Úvod

Tématem této práce je fotovoltaický ohřev vody pro využití v domácnosti.

V dnešní době, kdy je elektrická energie velmi rozšířená a stále hojněji využívána na různorodé úkony, je stále více nutné se věnovat alternativním zdrojům. Jedním z těchto zdrojů je také energie ze slunečního záření, která se v konkrétním případě využije na ohřev vody pro potřeby domácnosti. Systém defakto spočívá v tom, že energie ze slunce je přeměněna v elektrickou energii, která se následně mění pomocí topné spirály v teplo. To je předáváno vodě v bojleru a využíváno na každodenní spotřebu v domácnosti. Tento systém, ohřívající vodu pomocí fotovoltaických panelů, nemůže z hlediska různých aspektů, ať už nevhodnému ročnímu období, či nevhodným klimatickým podmínkám, fungovat stále nepřetržitě a nezávisle na síti. Proto bude dále popsáno, jak celé toto zařízení funguje, jakou má potenciální finanční návratnost a jakou má nutnou závislost na energii ze sítě. Tato bakalářská práce popisuje skutečný projekt, jehož data byla zaznamenána po dobu jednoho roku. V následujících bodech bude provedena podrobná analýza dat.

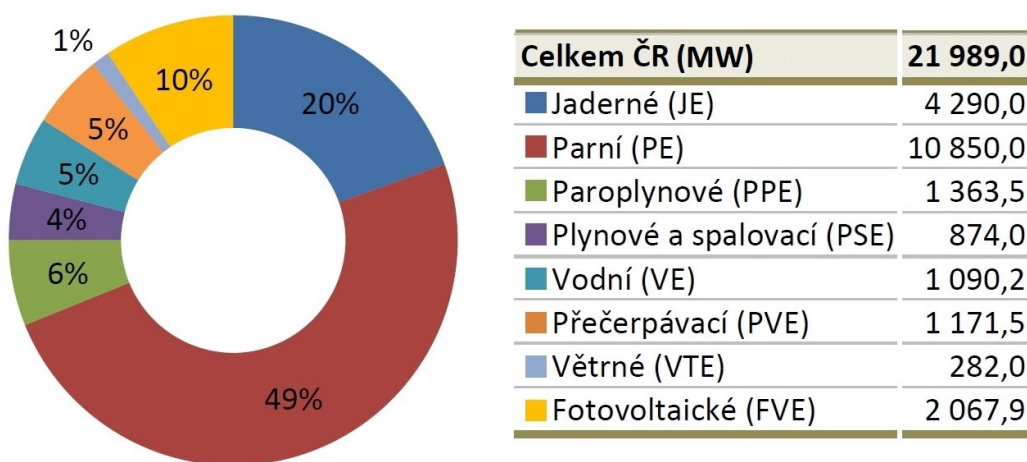
V první řadě je důležité popsat princip fotovoltaických panelů, jejich typy, možnost využití a zvážení jejich efektivity práce. Dále se zaměřím na ostatní důležité součásti systému a následně na jeho periferie.

V neposlední řadě také zhodnotím výhody a nevýhody tohoto systému - jestli je zde možnost finanční návratnosti. Dále se pokusím ověřit, jestli je přímo tento typ ohřevu dostačující sám o sobě, či je výhodné jej inovovat a jakým způsobem.

2 Fotovoltaické panely

FV panely patří do těch zdrojů energie, které ke své funkci využívají denní světlo, tedy sluneční svit. Jedná se tedy o přeměnu energie ze slunce na elektrickou energii. Obecně, zdroje, kterých je v přírodě neomezené množství, nazýváme obnovitelnými zdroji energie. Tyto zdroje nemají nekonečnou energii, tedy nejsou nevyčerpatelné, avšak vzhledem k jejich životnosti a časovému horizontu jejich využití je můžeme nazývat obnovitelnými. Při změně veškerých OZE nevznikají žádné emise a přeměna probíhá velmi ekologicky, na rozdíl od spalování fosilních paliv. Fosilní paliva jsou navíc vyčerpatelná a jejich získávání a přeprava či manipulace škodí životnímu prostředí. V horizontu posledních dekád je využívání obnovitelných zdrojů stále na vzestupu, vznikají sofistikovanější metody pro získávání elektrické energie čistším způsobem, a to jak ve velkých, tak v nejmenších aplikacích, jako je například ohřev vody pro rodinný dům pomocí FV panelů umístěných přímo na střeše objektu. OZE bohužel nejspíš nikdy nebudou dominovat jakožto hlavní zdroje elektrické energie, ale jejich podíl při bilanci výroby elektrické energie rozhodně není nijak zanedbatelný. Mezi OZE tedy můžeme řadit energii větrnou, sluneční, geotermální, energii přílivu a odlivu apod. V následujících podkapitolách bude vypsán princip nejvyužívanějších fotovoltaických panelů, zvážení jejich výhod, nevýhod a vhodnost použití. [1]

V rámci této práce jsou zmíněny a také použity pouze FV panely na bázi křemíku.



Obrázek 1 Bilance instalovaného výkonu v rámci ČR k roku 2016 (zdroj: oze.tzb-info.cz)

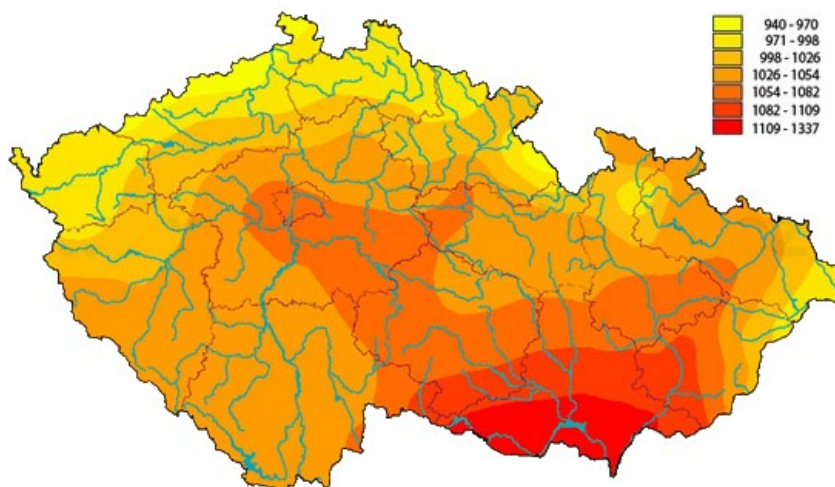
2.1 Slunce jako zdroj energie, rozložení solární využitelnosti v ČR

Slunce uvolňuje obrovské množství energie pomocí termojaderných procesů probíhajících uvnitř něj. Vyzařuje tak elektromagnetické záření dopadající na zemský povrch. Toto záření obsahuje velmi široké spektrum od ultrafialového až po infračervenou oblast. Přibližně 99% světla dopadajícího na zemský povrch je v rozsahu vlnových délek od 0,3 μm do 4 μm ; maximum viditelného spektra se nachází blízko 0,5 μm . Polovina z celkového záření spadá do infračervené oblasti, 40 % se nachází ve viditelné oblasti a konečně 10 % náleží ultrafialové oblasti spektra.

Při průchodu skrz atmosféru je sluneční svit různě absorbován a rozptýlován. Valná většina sluneční energie, která spadá pod hranici 0,3 μm vlnové délky, je atmosférou absorbována. Sluneční energie dopadající na jednotku plochy zemského povrchu se nazývá solární konstanta; její velikost závisí na roční době a pohybuje se od 1410 do 1320 W/m^2 . [1]

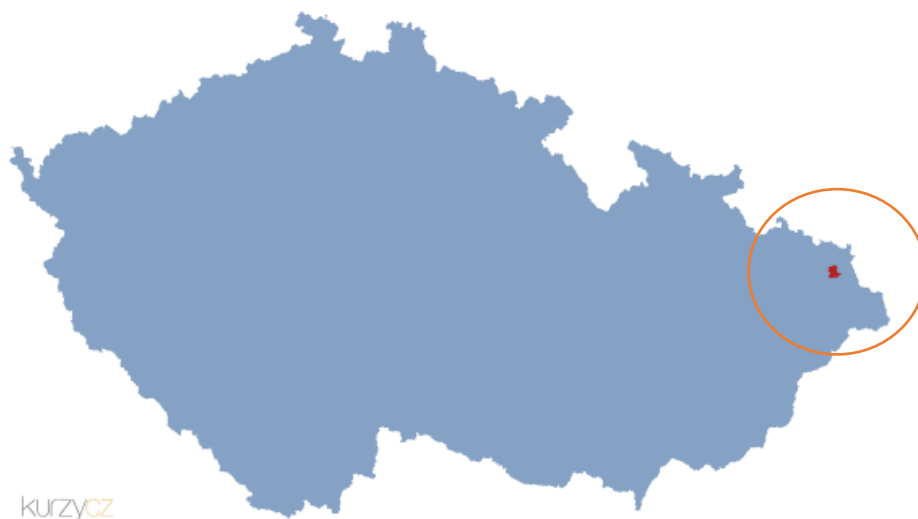
Sluneční záření dopadající na zemský povrch je složeno z difuzního a přímého záření. Složení a intenzita záření je dána ročním obdobím, počasím, denní dobou a zeměpisnou šířkou. Za jasných dnů převládá přímé záření – má jasný, přímý směr, vysokou intenzitu a vrhá ostré stíny. Naopak, při zatažené obloze a v těch dnech, kdy slunce není přímo viditelné, je sluneční světlo vychylováno v mracích, v oparech nebo v mlze, dopadá pak na zemský povrch takřka v celém spektru jako difuzní záření. V takovémto případě a za individuálních okolností má zpravidla záření hodnotu nižší než 1000 W/m^2 . [3]

Pokud sečteme energetický obsah přímého a difuzního záření všech slunečních hodin v roce, dostaneme tak hodnotu ozáření v kWh na plochu 1 m^2 po 1 rok. Na území České republiky se tato hodnota pohybuje mezi 950 až 1340 kWh/m^2 . Pro území Česka obecně platí skutečnost, že čím jižněji se oblast nachází, tím je větší úhrn slunečního záření, tak, jak je zřejmé na obrázku níže. [1]



Obrázek 2 Mapa slunečního záření na území ČR (zdroj: isofenergy.cz)

Rodinný domek v Havířově, který bude nadále předmětem celé této práce je umístěn na východní straně Česka a podle předchozího obrázku (*Obrázek 2*) leží přibližně v oblasti, kde je průměrná hodnota slunečního svitu 998 – 1026 kWh/m². Poloha objektu je zde zmíněna úmyslně, jelikož výsledek veškeré práce s daty by mohl pro stejný objekt představovat rozdíl, pokud by byl umístěn např. na severu Čech, či jihu Moravy.



Obrázek 3 Umístění Havířova na mapě ČR (zdroj: kurzy.cz)

2.2 Energie ze slunečního světla

Prvním důležitým kritériem k výrobě elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů jsou v zásadě dvě věci.

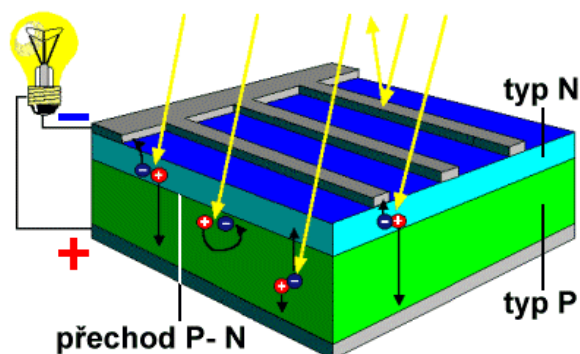
- a) Volné elektrony
- b) Elektrický potenciál, který je uvede do pohybu ze strany od zdroje do spotřebiče [3]

Solární články využívají principu přímé přeměny světla (z řeckého „photo“ – světlo) na elektrickou energii (volt – zn. napětí), fotovoltaický jev byl objeven v roce 1839 fyzikem Alexanderem Bequerelem. Přeměna sluneční energie na elektrickou probíhá nehlukně, bez emisí a nespotebovává látky v solárně aktivních materiálech. [2]

Jednotlivé články jsou tvořeny polovodiči, zejména křemíkem. Polovodiče jsou ty materiály, jejichž vodivost leží mezi vodivostí kovu a dielektrika. Čtyři vnější atomy křemíku tvoří vazby elektronových párů se sousedními atomy. V případě krystalických solárních článků vzniká pravidelná krystalická mřížka. V každém článku jsou spolu obsaženy dvě elektricky odlišně vodivé a odlišně dotované polovodičové oblasti (*dotování = umělé „znečištění“, tedy dodání atomů jiného prvku do polovodiče, za účelem změny vlastností a vodivosti*). Vodivost křemíku se výrazně liší, pokud jsou v něm obsaženy určité příměsi. Pokud „nadopujeme“ křemík fosforem, vznikne polovodič typu N, který obsahuje nadbytečné elektrony a je vodivý více než křemík sám o sobě. Když naopak přidáme bor, vznikne polovodič typu P, který obsahuje nadbytečné díry (díry = místa s kladným nábojem, kde chybí elektron).

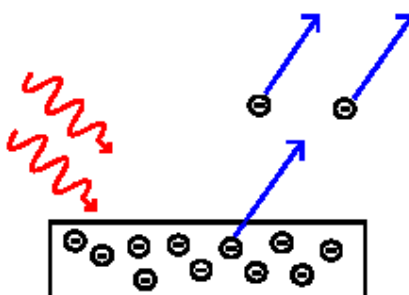
Mezi oblastmi kladně dotovanou (P) a záporně dotovanou (N) tak vzniká elektrické pole. To je způsobováno difuzí nadbytečných elektronů z oblasti N do P v oblasti vzniklého tzv. PN přechodu. V podstatě se dá tento jev zjednodušeně nazvat snahou o vyrovnaní koncentrace vzniklých děr a uvolňujících se elektronů.

Ideálně by proces rekombinace měl probíhat pouze v jednom směru – tedy proud by měl být propouštěn pouze od kladné vrstvy k záporné, tedy od anody ke katodě. Tento problém z velké části řeší potenciálová bariéra, která zabraňuje volnému přechodu elektronů v opačné polaritě, tedy v závěrném směru, tedy ze strany záporné do kladné. Je tedy téměř vyloučeno, aby docházelo ke spojení elektronů a děr. Je ale umožněna rekombinace v propustném směru, jež je základem principu funkce. [2],[3]



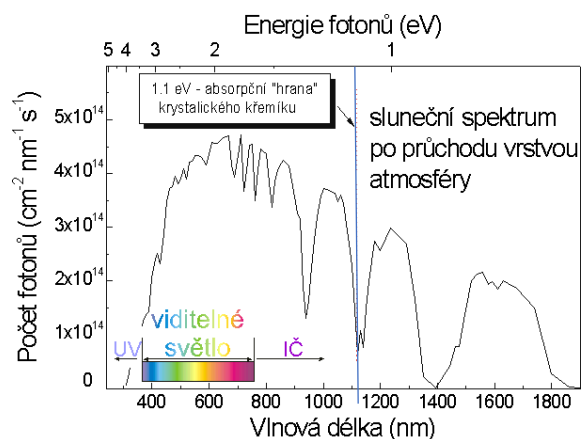
Obrázek 4 Ilustrační princip funkce PN přechodu ve FV panelu (zdroj: cez.cz)

Mějme elementární příklad, kdy slunce svítí na takovýto fotovoltaický panel. Při slunečním svitu dochází k tzv. fotoelektrickému jevu. Ten je přesně definován jako dopad fotonů slunečního záření na fotočlánek. Je to vlastně fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z obalu atomu a následně mohou být emitovány nebo-li vyzařovány z látky z kovu v důsledku absorpce elektromagnetického záření (podle *Grafu 2*). Díky již probíhající rekombinaci vrstev P a N se zde z krystalové mřížky uvolňují elektrony, které se hromadí ve vrstvě N. Mezi těmito dvěma vrstvami dochází ke vzniku elektrického napětí, které má zpravidla hodnotu 0,5 až 0,6 V. Takovéto vyrobené napětí se dále navyšuje tak, že se spojí tyto jednotlivé články paralelně (za účelem zvýšení proudu), či sériově (ke zvýšení napětí). [3]



Obrázek 5 Demonstrace fotoelektrického jevu (zdroj: cs.wikipedia.org)

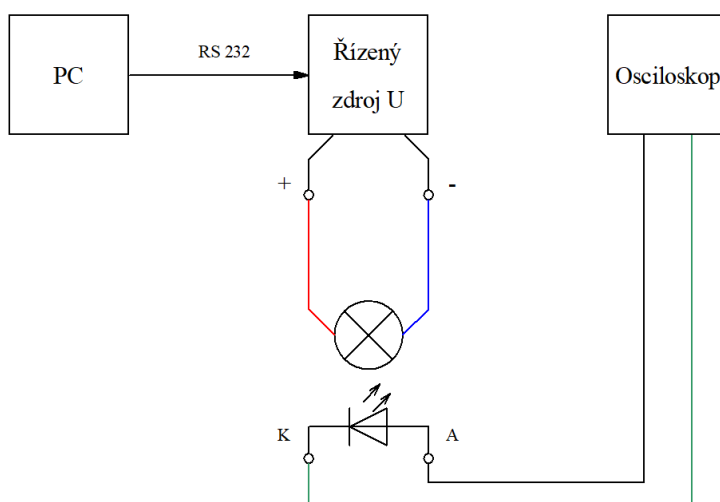
K tomu, aby celý tento proces mohl být realizován, je nutné splnit základní požadavek. K tomu, aby mohl být elektron uvolněn z krystalové mřížky, musí mít dopadající foton energii, která je potřebná k překonání tzv. zakázaného pásu. U rozdílných materiálů jsou tyto hodnoty odlišné. Např. u křemíku je tato hodnota 1,12 eV. V této podmínce závisí na vlnové délce záření; odpovídá infračervenému záření o vlnové délce cca 1105 nm, tedy přesně, jak vidíme na obrázku níže. Pokud má záření kratší vlnovou délku, má sice dostatečnou energii, která způsobí vznik elektronu i díry, ale zbylá energie se přemění na teplo, které se nedá nijak využít a ke konečné výrobě napětí tedy nedojde. V obecné elektrotechnice je teplo nežádoucí. Naopak, pokud mají fotony záření větší vlnovou délku, prochází sice skrz křemík, ale není v něm záření nijak absorbováno. Lze tedy využít maximálně 50% energie slunečního záření, v reálné praxi se ale dosahuje hodnot polovičních. Vyjádření závislosti slunečního svitu, tedy vlnové délky k počtu fotonů můžeme vidět na obrázku níže. [3]



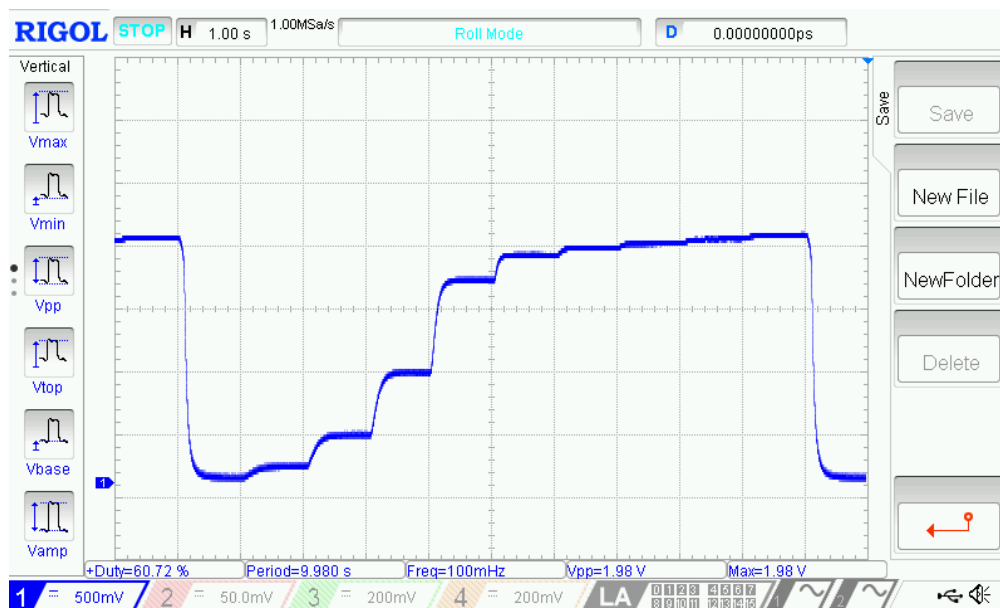
Obrázek 6 Závislost vlnové délky na počtu fotonů (zdroj: isolar.cz)

Obecně se princip rekombinace mezi vrstvami P a N dá přirovnat k diodě. Vezměme do úvahy například obyčejnou LED diodu. Pokud na její svorky budeme přikládat odpovídající napětí, bude vydávat viditelné světlo. Naopak, pokud necháme na tuto diodu svítit denní světlo, na jejích svorkách se objeví napětí. Čím více světla bude na diodu dopadat, tím větší napětí na ní bude naměřeno. Pro tento jev jsem provedl vlastní měření, jehož zpracování je viditelné na obrázcích níže.

Pomocí počítače, který byl napojen na řízený zdroj napětí, jsem tímto zdrojem napájel autožárovku, kterou jsem nechal z velmi malé vzdálenosti svítit na klasickou LED diodu. Na PC jsem nastavil různé stupně napětí, takže žárovka v jednotlivých krocích svítila stále výrazněji a tím jsem na LED diodě získával vyšší a vyšší napětí, které jsem odečítal pomocí osciloskopu. Na grafu (*Graf 1*) je zřejmá hodnota napětí, která činí 1,98 V.



Obrázek 7 Schéma zapojení experimentu

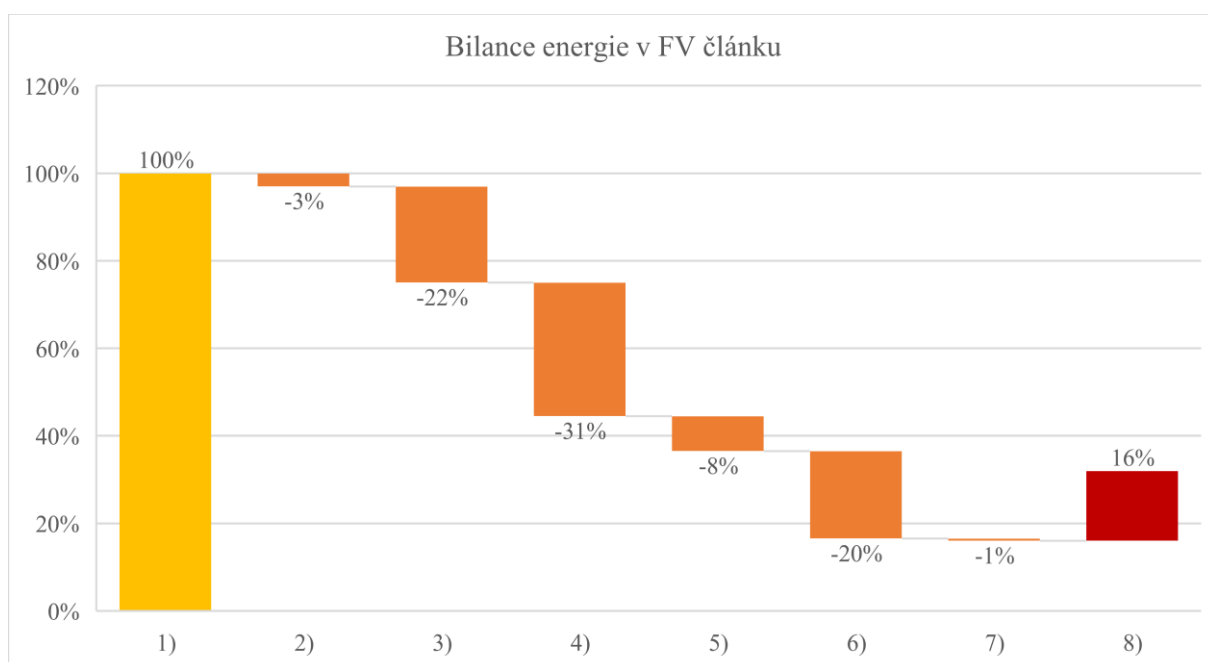


Graf 1 Graf naměřených hodnot napětí na diodě v závislosti na úrovni osvětlení světelným zdrojem

Tento jev je zde demonstrován proto, že princip diody u fotovoltaických panelů funguje velmi podobně. Ve stavu, kdy je ozářen slunečním světlem (nebo jiným světelným zdrojem), vzniká na jeho svorkách napětí. Jestliže je zároveň připojen na zátěž, protéká proud a dostáváme tak využitelnou energii. Pokud však přiložíme na jeho svorky napětí, a uvedeme jej tak do režimu spotřebiče, panel začne vyzařovat v infračerveném spektru a začne se zahřívat. Tento jev se používá mimo jiné k výchozí kontrole panelů, která termovizí odhalí, zda-li je panel stoprocentně funkční. Možnosti detekce vad FV panelů jsou popsány v samostatné kapitole.

2.3 Solární článek

Základní princip tedy spočívá v rozdílně dotovaných křemíkových vrstvách. Strana obrácená ke slunci je záporně dotovaná fosforem, vrstva pod ní je kladně dotovaná bórem. Přední strana FV panelu musí co nejlépe propouštět světlo. Na povrchu panelu by se mělo světlo co nejméně odrážet, aby bylo co nejvíce fotonů absorbováno. Odtud je známé typické zabarvení panelů do černé, hnědé, či tmavě modré barvy (záleží na typu panelu). O principu funkčnosti je napsána kapitola výše; nyní se dostáváme k tomu, kolik energie dokáže panel přeměnit v dále využitelnou elektrickou energii. Na grafu níže (*Graf 2*) můžeme vidět celkovou bilanci toku energie ve fotovoltaickém článku. Zpracování těchto hodnot je průměrné a odpovídající pro více typů FV článků. V tabulce pod grafem jsou rozepsány body jednotlivých hodnot (*Tabulka 1*) [2]



Graf 2 Celková bilance toku energie v FV článku

Tabulka 1 Význam jednotlivých bodů

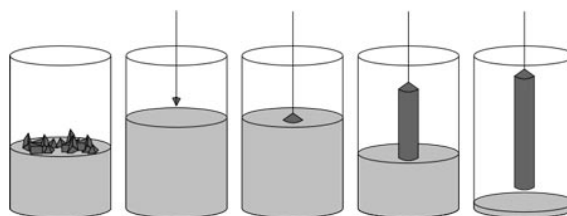
Bod	Název	Bilance
1)	Dopadající sluneční energie	100%
2)	Reflexe a zastínění předními kontakty	-3%
3)	Malá energie fotonů dlouhovlnného záření	-22%
4)	Nadměrná energie fotonů krátkovlnného záření	-30,50%
5)	Rekombinace	-8%
6)	Spád potenciálu v pásmu prostorového náboje	-20%
7)	tepelné ztráty proudu	-0,50%
8)	využitelná el. energie	16%

Jak vidíme na grafu, největší procentuální úbytek sluneční energie je v bodech 3 a 4, tedy nadměrná energie fotonů dlouhovlnného a krátkovlnného záření. Toto záření nemůže být nijak využito, protože jeho hodnota leží buďto nad 1105 nm a v druhém případě pod 350 nm vlnové délky λ , jak je popsáno v předchozí kapitole (viz *Obrázek 6*). Ideální hodnota vlnové délky tedy leží mezi těmito dvěma body, nejlépe blíže k vyšší z těchto hraničních hodnot.

V následujících podkapitolách budou představeny nejčastější typy FV článků, které jsou nejčastěji využívány a běžně dostupné na trhu.

2.3.1 První typ fotovoltaického článku – monokrystalické články

Jedná se o články, jejichž základ je v křemíku. Monokrystalické je nazýváme jakožto skládající se z jediného krystalu. Výroba spočívá v tzv. Czochralskiho procesu (*podle polského vědce jménem Jan Czochralski*). Vysoc čistý křemík se taví v kelímku při teplotě 1420 °C a poté je do taveniny ponořen zárodek krystalu. Při pomalém otáčení je vytahována ven kulatá monokrystalická tyč o délce až jednotek metrů a průměru desítek cm; proces je naznačen na *Obrázku 8*. Tato tyč je dále zpracována a rozřezána na tenké destičky o určitém rozměru. Ty jsou již dotovány příměsí typu P. Následně se napaří vrstva dotovaná difuzí fosforu (typ N). Po instalaci zadní kontaktní vrstvy a nanesení antireflexní vrstvy je článek zhotoven. Čím méně světla se od panelu odrazí, tím více světla jsme schopni hospodárně využít. Povrch monokrystalického panelu je tmavě hnědý až černý. Vyrábí se v mnoha tvarových uspořádání (kruhové, čtvercové, šestihranné atp.). Jeho elektrická účinnost se pohybuje výše než průměrná, dosahuje až 21 %. Rozměry všech panelů se obecně udávají v palcích. [2], [3]



Obrázek 8 Demontrace výroby monokrystalického křemíku (zdroj: www.top-alternative-energy-sources.com)

Výhody:

- Vysoká účinnost
- Efektivní dodávání energie i za horších světelných podmínek, např. při zatažené obloze
- Rozmanitost tvarů panelů

Nevýhody:

- Náročný výrobní proces
- Vysoká cena
- Nejlepší účinnost dosahují za přímého slunečního záření

2.3.2 Druhý typ fotovoltaického článku – polykrystalické články

Mají také základ v křemíku. Polykrystalické rozumíme jako mnohokrystalové. Vyrábí se pomocí metody blokového lití – křemík se ve vakuu ohřívá až do teploty 1500 °C. Následně se v grafitovém kelímku regulovaně ochlazuje a to až k bodu tání; toto ochlazování trvá až 3 dny. Tímto způsobem vznikají polykrystalické bloky, které jsou dále zpracovány na jednotlivé destičky. Pomocí metody blokového lití jsou tvořeny krystaly s rozdílnou orientací. Zbarvení panelu je jasně modré, mohou být viditelné třpytící se krystalické struktury, tvar je zpravidla čtvercový nebo obdélníkový. Elektrická účinnost se zde obvykle pohybuje mezi 13 – 16 %.

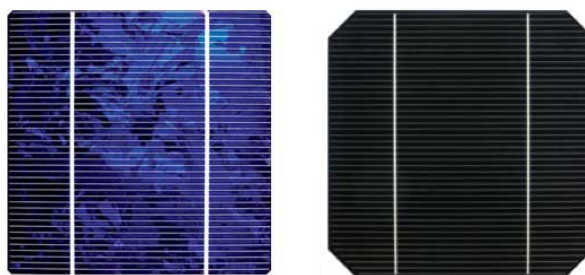
Výhody:

- Příznivější cena
- Efektivní výroba energie i při stinných podmínkách
- Nižší náročnost výrobního procesu
- Malý pokles výkonu v horizontu 15 – 25 let provozu

Nevýhody:

- Nižší účinnost
- Při instalaci určitého výkonu větší požadavky na plochu než u monokrystalických panelů

Pozn.: V rámci dat této práce popisující FV ohřev vody pro domácnost byly instalovány právě polykrystalické panely.



Obrázek 9 Vizuální odlišnost polykrystalického (vlevo) a monokrystalického článku (vpravo)

2.3.3 Třetí typ fotovoltaického článku – amorfni křemíkové články

Amorfni křemíkové (a-Si nebo a-Si: H) solární články patří do kategorie křemíkových tenkých článků, kde se na substrát ukládá jedna nebo několik vrstev fotovoltaického materiálu. Proces výroby je založen na rozkladu vhodných sloučenin křemíku (silanu nebo dichloristanu) ve vodíkové atmosféře. Tímto způsobem se dá docílit přípravy velmi tenké vrstvy křemíku (jen několik mikrometrů) na skleněné, nerezové nebo plastové podložce. Teplota používané metody je od 200 – 500 °C, což je markantně méně, než u předešlých typů panelů.

Slovo „amorfni“ znamená to, že nemají pravidelnou krystalickou strukturu, a navíc obsahují určité množství vodíku. Jedná se o to, že křemíkový materiál není strukturován ani krystalizován na molekulární úrovni. Nízký výkon amorfni křemíkových solárních článků dlouhodobě omezuje jejich použití pouze na malé aplikace – např. pro malé kapesní kalkulačky apod. Tento problém je částečně vyřešen „stohováním“ několika amorfni solárních článků na sebe, což zvyšuje jejich výkon a činí je efektivnějšími. Očekává se, že tyto technologie budou v následujících letech rychle růst, jakmile budou zdokonalené a podstoupí příslušný vývoj.

V laboratorních podmínkách vědci posunuli účinnost na 12,5 %. Účinnost amorfni křemíkových solárních článků, které jsou vyráběny ve velkoobjemových procesech, se pohybuje od 6 % do 9 %. Oerelikon v roce 2009 dosáhl světového rekordu stabilních amorfni solárních článků nad 10 %. V roce 2011 představovaly amorfni křemíkové solární články asi 3 % trhu. [2], [4]

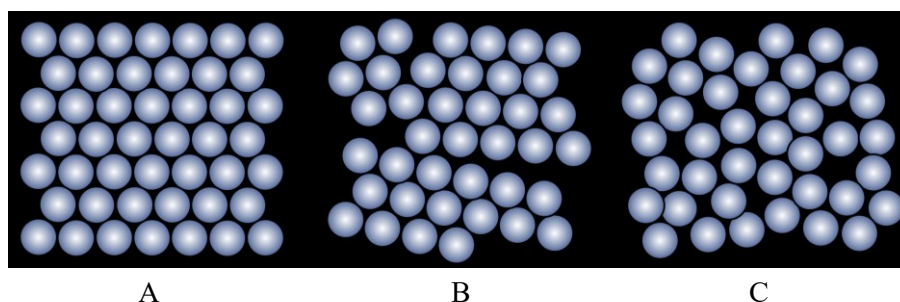
Na následujícím obrázku můžeme vidět srovnání krystalické vazby křemíku.

Výhody:

- Příznivý teplotní koeficient – v létě při vyšších teplotách nemají takový úbytek, jako předešlé typy
- Výborné vlastnosti i za zastínění
- Perfektní vlastnosti i za difuzního světla, špatného počasí či zatažené oblohy
- Příznivá cena
- Nejméně náročný výrobní proces (v porovnání s předešlými typy)

Nevýhody:

- Oproti klasickým panelům je vyšší cena za instalaci – jedná se o příslušenství, nikoli o součást panelu (rámy, mechanické díly, atp).
- Malý výkon panelů – nutnost větších ploch při stejném výkonu v porovnání s předešlými typy

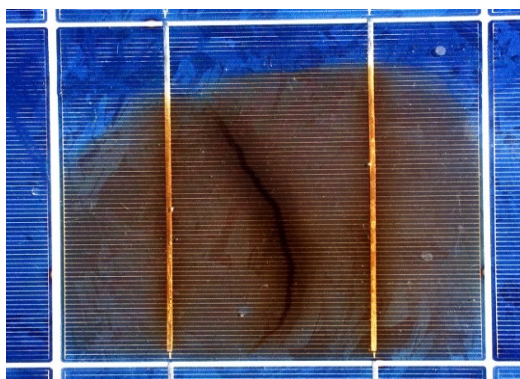


Obrázek 10 Vyobrazení různých krystalických struktur křemíkových vazeb. Zleva monokrystalická (A), dále polykrystalická (B) a amorfni (C). (Zdroj: en. Wikipedia.org)

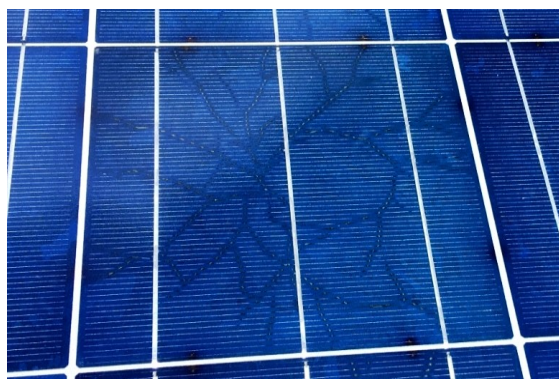
2.4 Detekce vad u FV panelů

Zjišťování vad panelů je důležitým krokem k zajištění spolehlivé dodávky vyráběného výkonu ke spotřebiči. V následujících stručných bodech budou popsány ty nejdůležitější kroky k detekci úbytku výkonu. Testovacích metod je více, avšak vypsány jsou pouze dva nejdůležitější typy detekce, body jsou obecně zaměřeny pouze na aplikaci v použití FV systému s bojlerem.

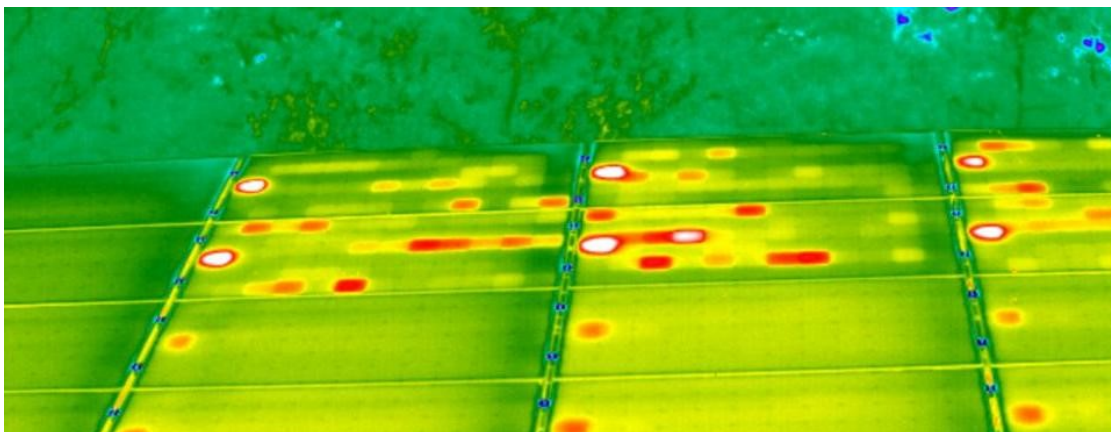
- a) Vizualní kontrola – nejběžnější a nejsnazší způsob kontroly panelů, který může majitel provádět pravidelně. Tento typ kontroly jakkoliv plně nenahrazuje další z uvedených metod, avšak dokáže odhalit množství poruch. Vizualně můžeme odhalit např. zežloutnutí EVA folie, „šnečí cestičky“, vypálené články, delaminace. Šnečí cestičky jsou křemíkové praskliny, které jsou vyvolané slunečním zářením a chemickou reakcí se stříbrem a s halogenidovými prvky a vlhkostí vcházející ze zadní strany panelu. V neposlední řadě také můžeme kontrolovat i záchytné háčky, či konstrukci, na které je panel připevněn; v silnějším větru by mohlo dojít k jeho uvolnění. Dále je možno zkontrolovat propojení a neporušenost kabelů a v neposlední řadě také odstranit možné nečistoty a cizí předměty, které by zastiňovaly panel a snižovaly tak jeho potenciální účinnost. Dvě z poruch jsou vyobrazeny na obrázcích (*Obrázek 11, Obrázek 12*)
- b) Termovizní kontrola – kontrola skrytých vad FV panelu. Termovizní kontrola může být provedena pouze ve dne, kdy je osvit minimálně 500 W/m^2 . Výsledný obraz v IR spektru může být ovlivněn nečistotami na povrchu panelu, ochlazování větrem, úhel snímání a intenzita slunečního záření. Ve snímku se proto zaměřujeme především na teplotní abnormality. K nejběžnějším chybám patří hotspot, což je místo, kde je teplota výrazně vyšší, než na zbytku panelu. Příčin hotspotu je hned několik, mezi nejběžnější řadíme zastínění cizími předměty, jako je listí, jiné nánosy apod., dále to mohou být mikrotrhliny způsobené přepravou, montáží, nebo pohybem osob po povrchu panelu. Další z častých závad je nefunkčnost části panelu. Tato vada bývá způsobena buďto uvolněným kontaktem, nebo poruchou by-pass diody. Objevují se i případy, kdy je přerušena pájená cesta mezi jednotlivými FV články – tuto vadu není možné odstranit, jelikož se závada nachází uvnitř zařízení. Termovizní snímek je znázorněn na obrázku (*Obrázek 13*) [5]



Obrázek 12 Vypálený FV článek (zdroj: oze.tzb-info.cz)



Obrázek 11 Šnečí cestičky (zdroj: oze.tzb-info.cz)



Obrázek 13 Snímek termovizní kontroly FV panelů (zdroj: solarnidiagnostika.cz)

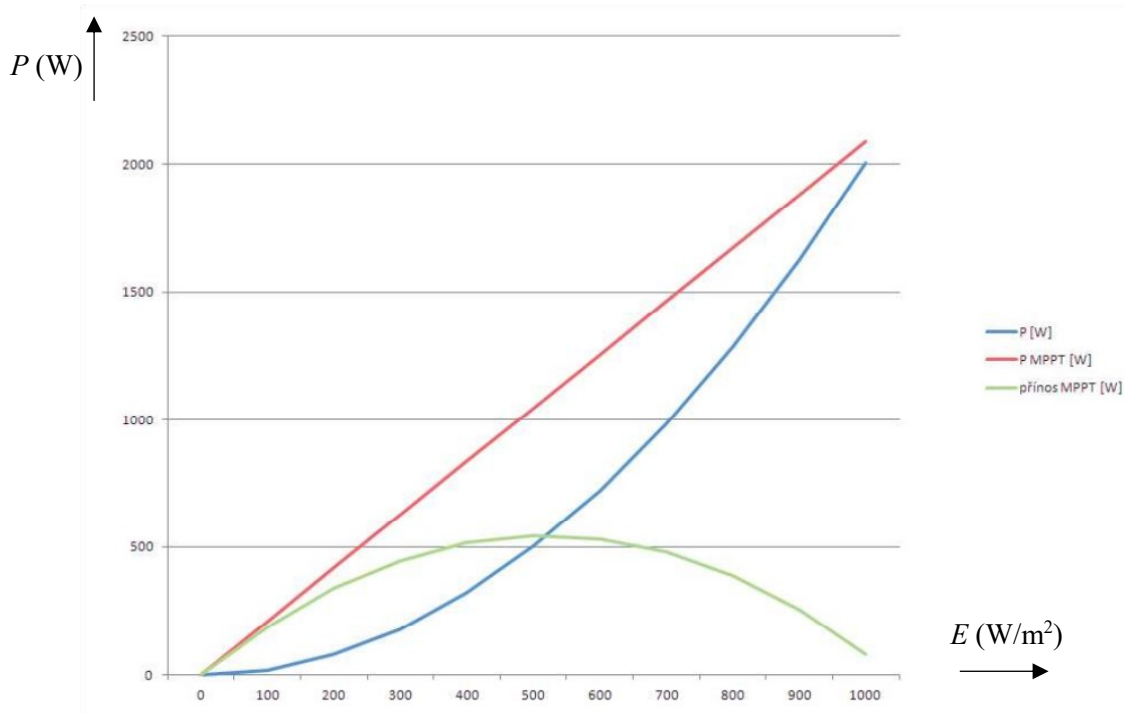
3 Další periferie systému

3.1 MPPT regulátor

MPPT = maximum power point tracker, což se dá volně přeložit jako sledování maximálního bodu výkonu. Jsou to vlastně DC / DC převodníky, které optimalizují shodu mezi vyrobenou energií a úložištěm této energie.

Příklad funkčnosti MPPT:

FV panely 2 kWp dodávají při intenzitě $1\,000\text{ W/m}^2$ proud $8,5\text{ A}$ při napětí 230 V . Jejich součin tedy odpovídá necelým 2 kW výkonu. Při poloviční intenzitě, tedy při 500 W/m^2 je proud i napětí o polovinu nižší, dodává tak $4,25\text{ A}$ s napětím 115 V , což při stejné ohmické zátěži představuje cca 500 W . Použitím MPPT se posune pracovní bod FV článků do pásna optimálního výkonu, kde při stejném proudu ($4,25\text{ A}$) může dodávat plné napětí 230 V . V součtu tak bude výkon cca 1 kW , což znamená dvojnásobný zisk výkonu při stejných podmínkách. Na grafu níže vidíme, jak by v ideálním případě MPPT regulátor prokazoval výkonový zisk. [6]

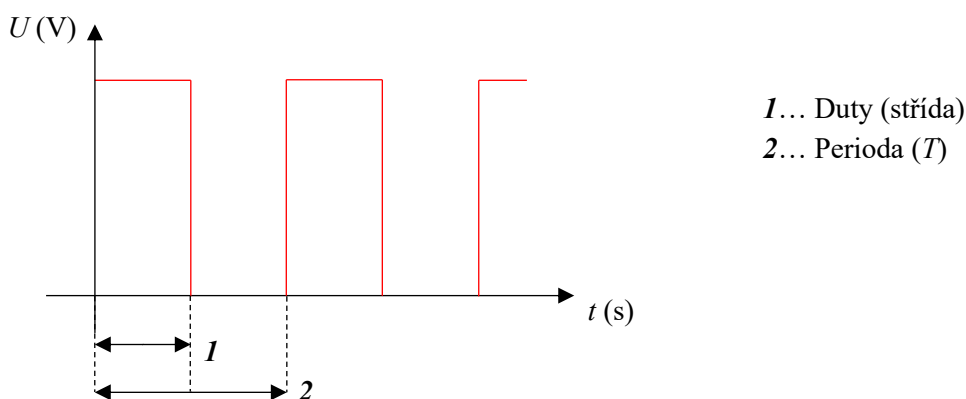


Graf 3 Příklad funkčnosti MPPT regulátoru (Zdroj: mojefotovoltaika.cz)

Bilance účinnosti MPPT se pohybuje mezi 93 – 97 %. MPPT je tedy vhodným prostředkem pouze pro zataženou oblohu, pokud je okolo poledne a je možné výkon uskladnit, regulátor je zkratován (bypass) a FV panely tak poskytují plný výkon přímo ke spotřebiči.

Vezměme v úvahu, že bychom měli např. FV panel o výkonu $P = 130 \text{ Wp}$, kterým bychom chtěli nabíjet baterii 12 V. Panely jsou však navrženy tak, aby měly hodnotu napětí vyšší než 12 V, poněvadž musí fungovat co nejefektivněji za každého počasí. Hodnota napětí se baterie pohybuje, v závislosti na nabití, tedy 10,5 V až 12,7 V. Když přepočteme známé hodnoty parametrů panelu, získáváme tím známý vztah $\rightarrow P = U \cdot I$, tedy $7,39 \cdot 17,6 = 130 \text{ W}$. Panel by ale do baterie dodával napětí 12 V a to s proudem 7,39 A, což je 88,7 W. Tím pádem by byl potenciál panelu nevyužit. Ale pokud zapojíme MPPT do obvodu, budeme na napětí 12 V dostávat 10,8 A, čímž dostáváme také 130 W; tím pádem využijeme celý výkon panelu. V podstatě konvertují vyšší napětí panelů na nižší, ale tím získávají vyšší proud. Tento regulátor je nutnou součástí souboru FV panelů, který zajišťuje, aby v každou část dne byl maximalizován ten nejvyšší možný využitelný výkon. [7]

K řízení MPPT regulátoru bývá obvykle užívána pulsně šířková modulace (známá pod zkratkou PWM), která řídí celý proces dodávky energie ke spotřebiči. Jde o to, že ze vstupních hodnot vytvoří obdélníkové pulzy, které mají přesný význam výkonu. V příkladu PWM byla pro názornost použita střída 50 % (viz Graf 3.1.2). V této aplikaci je kmitočet o velikosti 15 kHz; perioda T je tedy určena vztahem: $f = \frac{1}{T}$, tedy její hodnota je $\frac{1}{15 \cdot 10^3} \mu\text{s}$, tedy přibližně 66,67 μs .



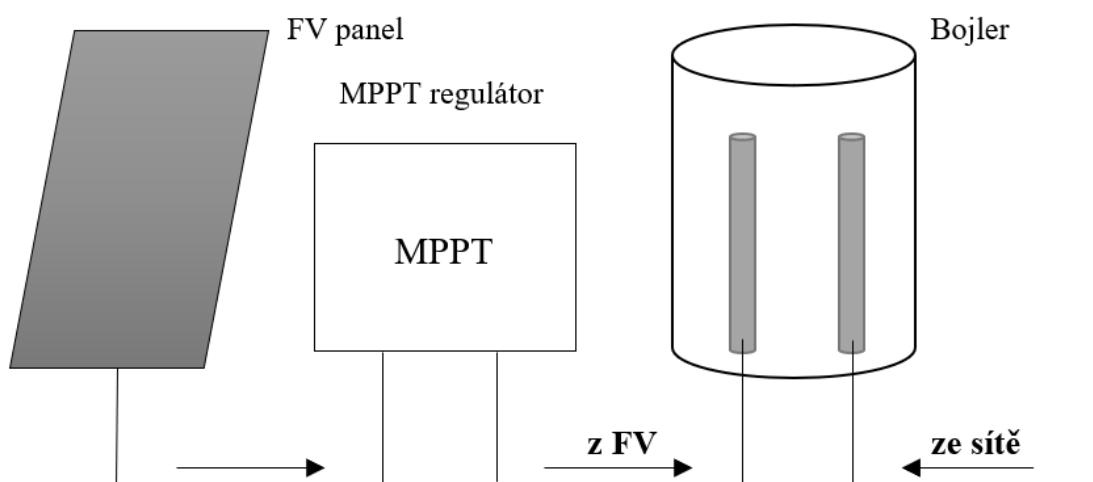
Graf 3.1.2 Demonstrace pulsně šířkové modulace (PWM)

Výkon přesně odpovídá poměru PWM. To znamená, že pokud je v této aplikaci maximální výkon z FV panelů $P_m = 2 \text{ kWp}$, odpovídá to střídě 100 %, tedy překlenutému MPPT regulátoru. Pokud je střída 75%, odpovídá to hodnotě o $\frac{1}{4}$ nižší, tedy $0,75 \cdot P = 1,5 \text{ kWp}$ a podobně. Obrázek výše tedy odpovídá hodnotě 1 kWp.

Pozn.: vzhledem k vysoké výstupní frekvenci a nízkému rozsahu měřicího přístroje pro $I_2 \rightarrow P_2$, nemohl být tento výkon korektně dosazen a s těmito daty se tedy nepočítalo. Veškerá data shromážděná z průběhů FV energie byla naměřena před vstupem do MPPT regulátoru, do výpočtů tedy zahrnují pouze $I_1 \rightarrow P_1$. Vzhledem ke skutečnosti, že PWM frekvence MPPT byla 15 kHz a vzorkovací frekvence měřicího přístroje 5,4 kHz, tak hodnoty proudu za MPPT nebyly měřeny korektně.

3.2 Bojler se dvojitou možností napájení

Jedná se o zařízení, které slouží k ohřevu teplé vody. Klasický elektrický bojler je připojen k elektrické síti a využívá povelů sepnutí HDO. Elektroměrový rozvaděč musí být vybaven přijímačem HDO, který je dále blokován v domovním rozvaděči přes stykač. Pokud je voda uvnitř bojleru studená, nebo vlažná, termostat v bojleru nebrání ohřevu a voda je tak ohřívána. Jestliže je voda v bojleru ohřátá a HDO v sepnutém stavu, nedojde k ohřevu díky nesepnutí termostatu. V případě kombinace s FV energií je napájení ze sítě bráno pouze jako dohřev. Pro primární ohřev vody je tedy využívána energie ze slunce. Bojler je v této aplikaci vybaven dvěma topnými spirálami, jedna na DC proud - vlevo (z FV) a druhá na AC – vpravo (ze sítě). Princip koloběhu vody uvnitř bojleru tato práce nebude popisovat.

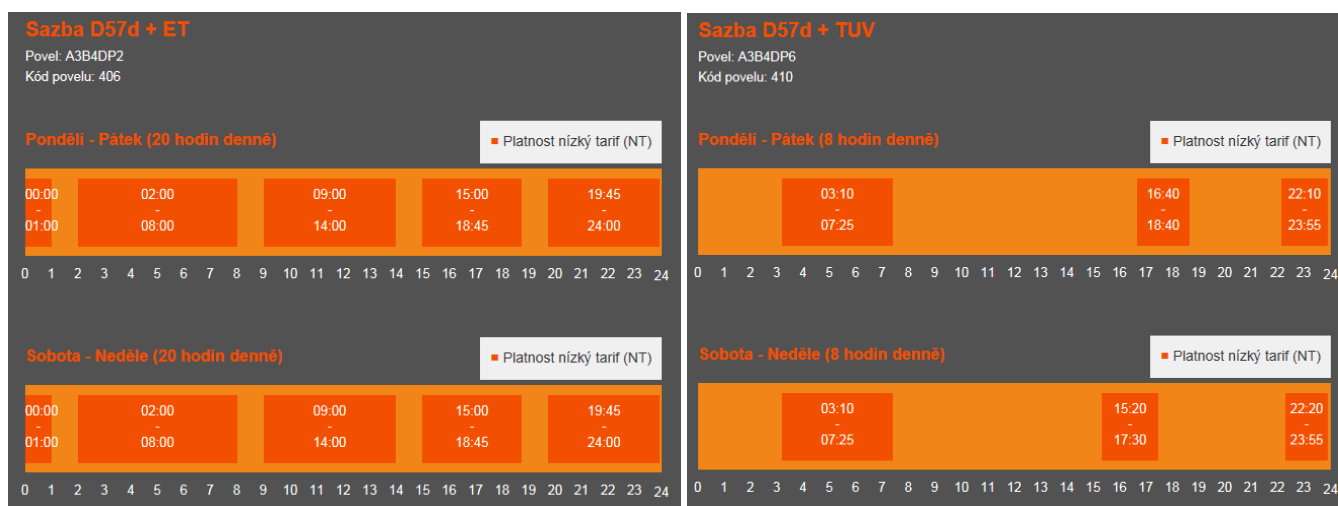


Obrázek 14 Jednoduché zapojení základních komponentů

3.3 Pověly HDO

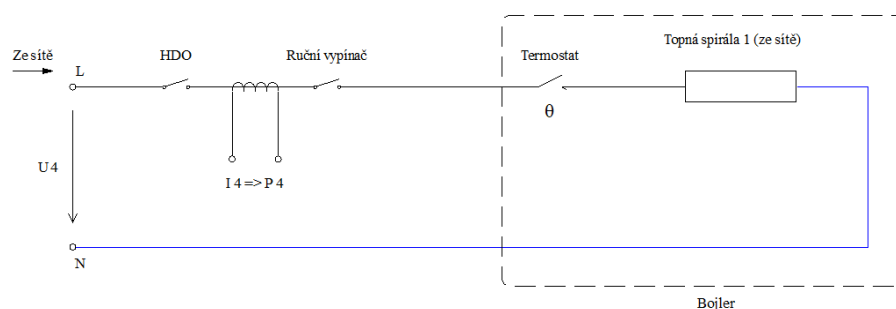
RD je vybaven dvousazbovým elektroměrovým rozvaděčem. Kromě klasické druhé sazby k ohřevu vody bojlerem má dům navíc elektrické vytápění, tudíž přijímač HDO pracuje se dvěma povely:

- 1) Povel D57d + ET (kód povelu 406) – určen pro vytápění domu pomocí elektrických rohoží. Celkově se jedná o 20 hodin nízkého tarifu (NT) a 4 hodiny vysokého tarifu (VT). Tato data v této práci nebudou hrát roli, jelikož se tento povel HDO používá pouze k vytápění, nesouvisí nijak s bojlerem a data pro něj nebyla zapsána.
- 2) Povel D57d + TUV (kód povelu 410) – určen pro spínání bojleru v domácnosti. Celkově se jedná o 8 hodin nízkého tarifu (NT) a 16 hodin vysokého tarifu (VT). Těmto datům se budu dále věnovat, jelikož souvisí s ohřevem vody.



Obrázek 15 Orientační časy oznamující spínání jednotlivých povelů HDO (Zdroj: cez.cz)

Uvažujme případ, že je bojler napájen ze sítě. Stykač je blokován signálem HDO, který spíná podle povelu 410. Zjednodušené schéma 1. části bojleru je znázorněno na obrázku níže.

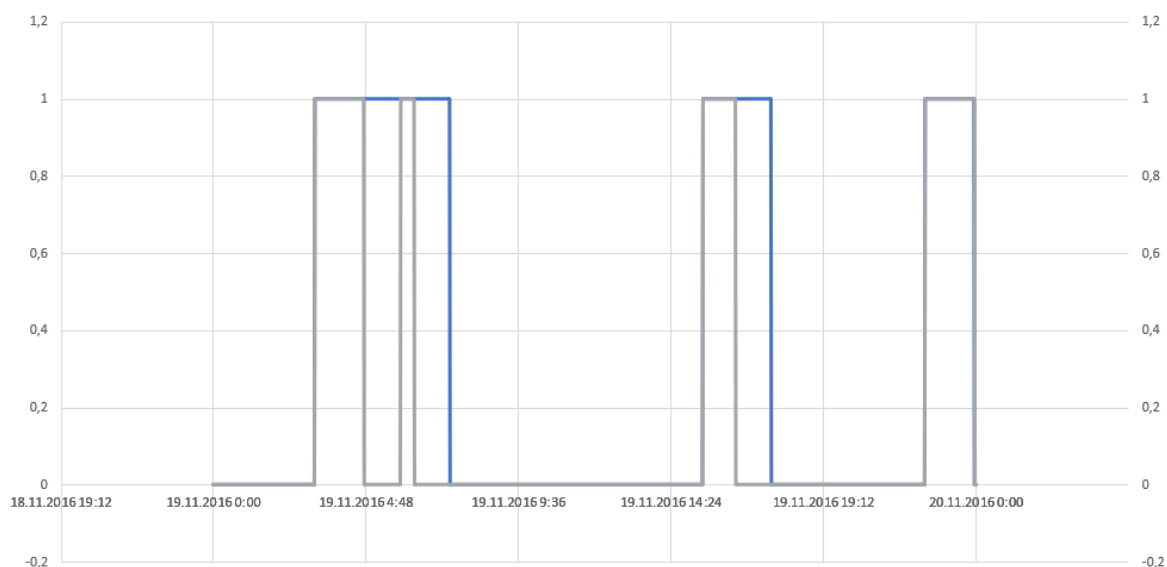


Obrázek 16 Schématické znázornění bojleru pro případ dohřevu ze sítě

Pozn.: Napětí U_4 je název napětí jedné z fází, která je určena k dohřevu ze sítě. Fotovoltaické části ohřevu náleží index 1.

Podle dostupných dat bylo naměřeno, že podle povelu 410, sazby D57d bylo sepnuto HDO, tedy nízký tarif trval 8 hodin během celého dne. Tato data ze dne 19. 11. 2016 byla zanalyzována a jejich průběh je zřetelný na grafu níže (Graf 4).

Pro zjednodušení orientace v grafu byl přepracován na rozložení pomocí jedniček a nul, je tedy zřejmé, kdy byl podle údajů bojler sepnut. 19. 11. 2016 byla sobota, zaměříme se tedy na porovnání s dolní částí vpravo (Obrázek 15).



Graf 4 Znáznornění skutečného stavu denní aktivity HDO

Na obrázku výše vidíme, že průběhy výkonu (šedou barvou) a napětí (modrou barvou) nejsou totožné. Tyto rozdíly jsou dány tím, že bojler již měl dostatek teplé vody a aby nedošlo k přehřátí nebo

destrukci bojleru, termostat neseplnul. Jak dále můžeme vidět, časové průběhy z *Obrázku 15* a *Grafu 4* si navzájem odpovídají – spínací časy korespondují s tím, co distributor el. energie deklaruje.

Pro dobrou orientaci v datech bylo provedeno následující: pokud bylo $U_4 > 200\text{V}$, potom jsme uvažovali, že je HDO sepnuto a bojler tedy může pracovat. Pokud bylo napětí $U_4 < 200\text{V}$, uvažovali jsme neseplnuté HDO, bojler tedy neměl přes blokaci možnost napájení. Takto bylo postupováno také v případě výkonu – pokud byl výkon $P_4 > 500\text{ W}$, bojler byl v chodu, konal tedy práci. Pokud naopak byl výkon $P_4 < 500\text{ W}$, bylo uváženo, že bojler neohřívá.

Suma napětí U_4 činila za 24 hodin 477 bodů (minut) aktivity, což je v porovnání s 8 hodinami, tedy 480 minutami ve výsledku skutečném výsledku 0,99375. Dodavatel tedy dodržuje z více než 99% spínací čas. Uvažujeme $t = 480$.

$$V_{U_4} = \frac{\text{aktiv.} U_4}{t} = \frac{477}{480} = 0,99375 \rightarrow 99,38\%$$

Nejedná se o vykonanou práci (dodanou energii do bojleru), je to pouze doba, kdy bylo na svorkách stykače HDO napětí, které mohlo být využíváno.

Suma proudu P_4 činila za 24 hodin 275 bodů (minut) aktivity. Z možných 480 minut je tedy využíván výkon 57%, přesněji 0,572917. Pokud bychom brali v potaz konkrétní situaci, a zaměřili se na 477 minut využití namísto 480, tak bychom dostali ve výsledku 0,57652. Rozdíl je tedy 0,003603, což je opravdu velmi minimální.

Skutečná doba využití síťového napětí by tedy byla dána podílem možné aktivity ku skutečné. Uvažujeme $t = 477$.

$$V_{P_4} = \frac{\text{aktiv.} P_4}{t} = \frac{275}{477} = 0,57652 \rightarrow 57,66\%$$

Pokud bychom měli uvažovat toto využití za $t = 24$ hodin, pak by výpočet vypadal následovně:

$$V_{24} = \frac{\text{aktiv.} P_4}{t} = \frac{\text{aktiv.} P_4}{1440\text{min}} = \frac{275}{1440} = 0,190972 \rightarrow 19,1\%$$

Čas délky sepnutí byl tedy v pořádku. Zaujala mne otázka, proč je předchůdce systému HDO, tedy spínací hodiny, nahrazen „frekvenčními přijímači“? Na obrázku níže je zobrazen graf společnosti ČEPS, který znázorňuje bilanci elektrizační soustavy. V horní (černé) části je nedostatek energie, v dolní (červené) části se nachází přebytek energie.



Obrázek 17 Balance energie v síti (Zdroj: ceps.cz)

Obrázek obsahuje 2 stavy. Výše položený, tedy od 0 MW do kladných 320 MW, reprezentuje na obrázku ten stav, kdy je energie nedostatek:

- a) Hlavní elektrárny (které pracují nepřetržitě) nestíhají pokrýt energetickou potřebu
- b) Zapnou se elektrárny, které mají rychlou dobu spuštění (špičkové)
- c) Energetický schodek klesá, bilance se ideálně blíží k nule (poměr vyrobené a spotřebované energie se téměř rovná).

Co se týče níže položeného rozmezí, tedy od 0 MW do záporných 320 MW, dochází ke stavu, kdy je v síti nadbytek výkonu:

- a) V chodu jsou pouze hlavní elektrárny, které se nemohou vypnout
- b) Některé ze špičkových elektráren mohou být vypnuty
- c) Energie se při nižším schodku použije pro motorický chod přečerpávacích elektráren, či nabití bateriových jednotek (jsou – li ve stavu, kdy se dají nabít)
- d) Pokud ani to nestačí, je nutné s přebytečnou energií naložit jinak:
 - 1) Spálit v odporech – neekonomické, nehospodárné
 - 2) Poslat do zahraničí, pokud je to možné a výhodné
 - 3) Vyslat signál HDO mimo stanovený čas
 - 4) Jiné řešení

Druhý a třetí z případů se samozřejmě stává nejčastěji. Distributor sice má povinnost sepnutí nízkého tarifu na 8 hodin denně, ale není striktně řečeno, že to bude ve stanovené časy – distributor je označuje pouze za orientační. Na obrázku výše vidíme oranžově označené místo, kde je zřetelně vidět, že byl přebytek energie v síti a zřejmě byl HDO signál vyslán mimo stanovený čas. Z hlediska ekonomické stránky věci je výhodné, aby se energie prodala a síť si odlehčila. Pokud bychom počítali, že by např. 100 000 domácností vlastnilo bojler (plný studené vody) o výkonu 2 kW, který by byl blokován přes HDO, tak bychom dostali 200 MW výkonu ze sítě ke spotřebitelům a zároveň bychom energii nemuseli nijak mařit a dostali navíc plnohodnotně zaplacenou. V datech, která byla k dispozici, bylo nalezeno hned několik takových situací, kdy se mimo dohodnutý čas HDO sepnulo. Pokud tedy dojde k sepnutí HDO mimo orientační čas, distributor se stejně snaží udržet v součtu 8 hodin NT a to nejen z hlediska ekonomiky.

4 Popis komplexní funkce systému

4.1 Popis měřeného objektu

AC měření

Rodinný dům, nízkoenergetický, obydlen 4 osobami, distribuční sazba D57d, spínání HDO (Morava) topení kód povelu 406, teplá voda kód povelu 410. Aktuálně platné časy spínání spotřebičů jsou na obrázcích výše.

Vytápění: elektrické přímotopné (podlahové topné rohože), topný žebřík v koupelně (občas zapínán i mimo topnou sezonu kvůli sušení ručníků).

Příprava teplé vody: 200 l boiler s dvěma elektrickými topnými spirálami – ohřev ze sítě (2 kW), nastavená teplota termostatu cca 60 °C, fotovoltaický ohřev (2 kWp), nastavená teplota termostatu na maximum (cca 90 °C). Při předpokladu dostatečného slunečního svitu následující den byl ohřev ze sítě vypnut uživatelem.

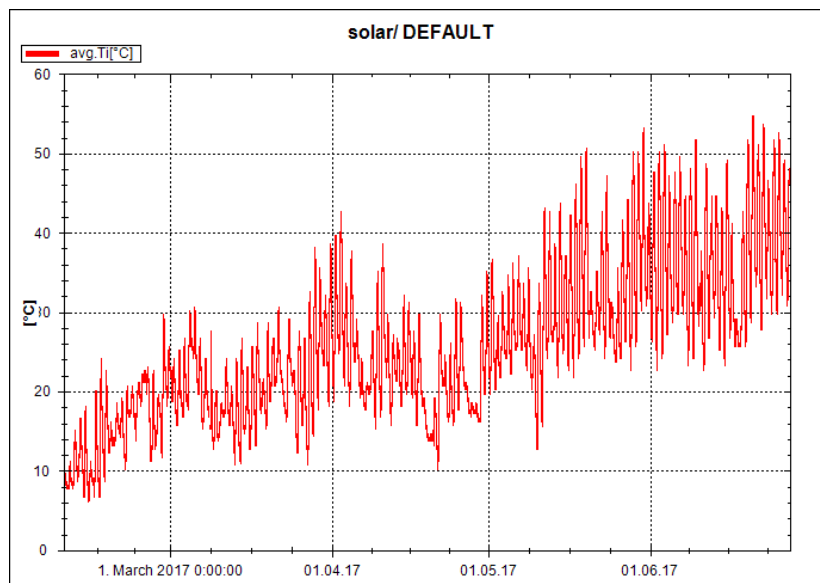
Fáze 4 měřicího přístroje (HDO) – příkon ohřevu teplé vody ze sítě (již je zahrnut v měření jedné z fází). Napětí je měřeno za stykačem HDO spínání ohřevu teplé vody – indikuje tedy, kdy ohřev teplé vody může probíhat. Proud indikuje, že termostat ohřevu ze sítě je sepnut a zároveň je stykač HDO ohřevu teplé vody a zároveň není vypnut ohřev spínačem ohřevu teplé vody ze sítě. Jsou tam tedy tři spínače v sérii.

Měření teploty je uvnitř měřicího modulu (měří o cca 8 stupňů víc než je okolní teplota). Měřicí modul AC měření je umístěn ve (většinou) nevytápěné místnosti zádveří v hlavním domovním rozvaděči spolu s ostatními přístroji. Přístroj pravděpodobně měří s rozlišením na půl stupně Celsia. Hodnoty mezi půlstupňovými hladinami pravděpodobně vznikly klouzavým průměrováním teplot.

DC měření

Napětí je bráno z přepět'ových ochran před MPPT regulátorem. Proud fáze 1 je proud do MPPT regulátoru – výroba FV panelů. Proud fáze 2 je měřen za MPPT regulátorem, měří špatně, kvůli vysoké výstupní frekvenci, kromě stavu, kdy je MPPT regulátor v bypassu (pro výkony nad 75 % jmenovitého, tedy asi 1,5 kW).

Měření teploty je uvnitř měřicího modulu (měří o cca 8 stupňů víc než je okolní teplota). Měřicí modul DC měření je umístěn v otevřeném DC rozvaděči měření FVE spolu s pojistkami a přepět'ovou ochranou. Rozvaděč je umístěn pod jižní střechou, střecha není zateplena, proto je taky okolní teplota měřicího modulu výrazně ovlivněna i ohřevem střechy sluncem a naměřené teploty dosahují hodnot až 55 °C.



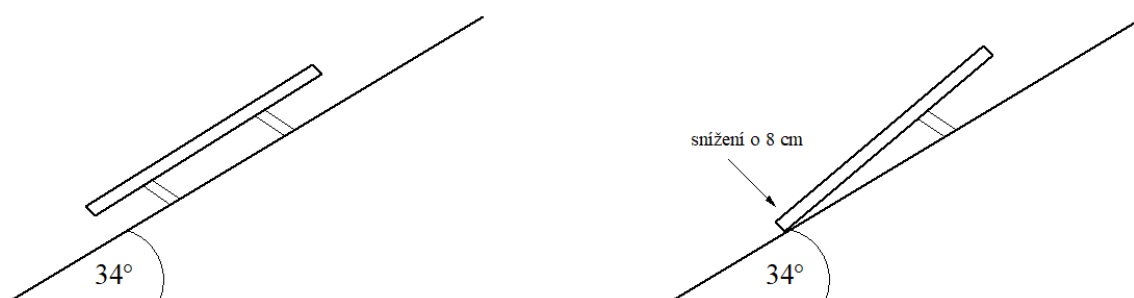
Graf 5 Měření teploty měřicího modulu DC

Doplňující informace k FV:

Na střeše je namontováno 8 ks panelů Axitec 250P/156 – 60S, které jsou namontovány a zapojeny v jednom stringu (string = řada panelů). $P_{mpp} = 2\,000\text{ Wp}$, $U_{mpp} = 245,6\text{ V}$, $I_{mpp} = 8,18\text{ A}$. Panely jsou umístěny na sedlové střeše se sklonem 34° (Jih (38°)).

Země rotuje okolo své osy s periodou o délce 24 hodin, vlivem tohoto otáčení se na zemi střídá den a noc. Zemská osa rotace svírá s rovinou oběžné dráhy úhel 23° . Pro severní polokouli platí v zimě ta skutečnost, která uvádí, že maximální výška slunce nad obzorem je jen přibližně 16° . [1]

Proto byla 28. 9. 2018 upravena výška ukotvení panelů tak, aby panely byly schopny lépe zachycovat sluneční svit pokud možno v kolmé ose se sluncem a měly tak vyšší účinnost. Situaci vidíme na obrázku níže.



Obrázek 18 Náklon FV panelů v zimních měsících

5 Komerčně dostupná zařízení, možnost dotací

V této kapitole jsou vypsány nabídky jednotlivých firem nabízejících kombinovaný FV systém ohřevu teplé vody pro domácnost. Budou zde popsány nabídky firem, které nabízejí defacto stejný produkt – jedná se o FV panely $P = 2$ kWp, MPPT modul, kabeláž, bojler o velikosti 200 l. Popřípadě je v ceně zahrnuta i montáž, revize a další.

1) Firma DZD Dražice

- Včetně bojleru, montáže, dodávky, revize a veškerých služeb
- Nabídka obsahuje pouze polykrystalické panely
- Firma neudává na svých stránkách záruku
- Firma DZD Dražice navíc nabízí program „Zelená úsporám“. Níže je přiložen text z jejich oficiálních stránek:

„Poslední časově neomezená výzva programu NZÚ již pamatuje i na ohřev teplé vody fotovoltaiou, jedná se o podoblast C.3.3 jen pro ohřev vody nebo případně podoblast C.3.4, kde se počítá i s dalším využitím vyrobené energie, ale s využitím měniče DC/AC a s připojením k distribuční soustavě. Podmínkou přiznání dotace je instalace technologie pro účinnou optimalizaci systému. Na výběr máte ze dvou možných zařízení, která jsou uvedena v oddílu – zařízení pro přizpůsobení zátěže proměnlivému výkonu FV panelů.



Maximální výše podpory pro podoblast C.3.3 – 35 000,- Kč na systém podoblast C.5 – 5 000,- Kč na projekt.

Maximální výše podpory pro podoblast C.3.4 – 55 000,- Kč na systém podoblast C.5 – 5 000,- Kč na projekt. “

Cena:

99 500,- Kč (bez DPH), což je **120 400,- Kč** (Vč. 21 % DPH) + možnost obdržení dotací (za určitých podmínek), teoreticky lze tedy získat až 40 000,- Kč dotaci

2) Obchodsolar.cz

- Pouze materiál vč MPPT (bez bojleru) a návod, bez revize, montáže a dopravy
- Nabízejí odbornou montáž za sníženou cenu - o 15% levněji
- Neudávají typ panelů (podle výkonu nejspíš polykrystalické), pouze výkon soustavy

- Udávají však záruku na MPPT – 2 roky a na panely 10 let, k tomu garance výkonu nad 80% po dobu 25 let.

Cena:

56 085,- Kč (bez DPH), což je **67 863,- Kč** (vč. 21 % DPH)

- Není zmínka o zprostředkování dotací.

3) Mojefotovoltaika.cz

- Pouze materiál (bez bojleru), DC/AC měnič s funkcí MPPT a návod, bez revize, montáže a dopravy
- Poskytují kompletní a potvrzený administrativní doklad pro získání dotace pro program „Zelená úsporám“
- Neudávají typ panelu, pouze výkon soustavy
- Udávají také záruku na MPPT – 2 roky a na panely 10 let, k tomu garance výkonu nad 80% po dobu 25 let.

Cena:

65 649,- Kč (bez DPH), což je **83 100,- Kč** (vč. 21 % DPH)

- Dotace až – 40 000 z ceny → celková cena by tedy mohla potenciálně činit **43 100,- Kč** (vč. DPH)

4) Axitec solar

- Pouze materiál (bez bojleru), DC/AC měnič s funkcí MPPT a návod, bez revize, montáže a dopravy
- Monokrystalické panely – životnost je udávána nejvyšší mezi výrobci – 85% v horizontu 25 let
- 12 let záruka
- Tento typ FV systému, a zaznamenaná data, jsou obsahem této práce

Cena:

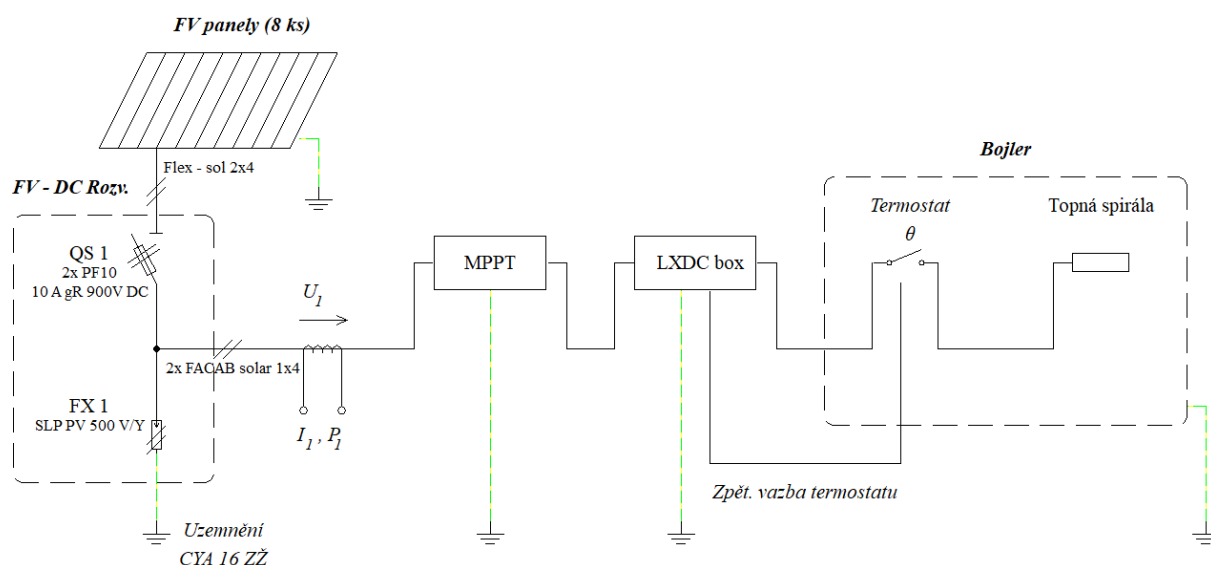
55 300,- Kč (bez DPH), což je **70 000,- Kč** (vč. 21 % DPH)

- Není zmínka o zprostředkování dotací.

6 Rozbor dat

6.1 Doba využití FV / odběru ze sítě

Na začátku je nutné představit si FV systém trochu podrobněji. Na obrázku níže vidíme schématické znázornění fotovoltaické části výroby el. energie a to se všemi komponenty, které výrobce dodává jako kompletní celek.



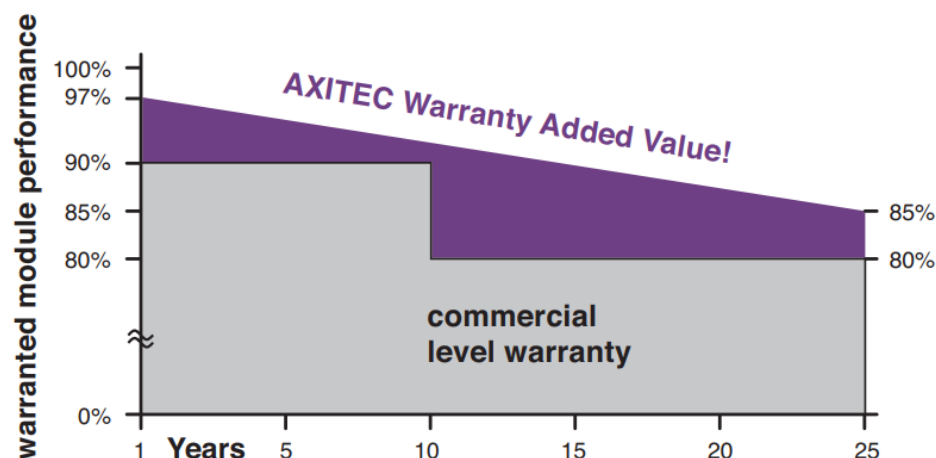
Obrázek 19 Schéma FV části výroby energie (Zdroj: firma Kelins, upraveno)

Systém obdrží energii vyrobenou pomocí 8 kusů FV panelů. Ta se následně přes měření ($I_1 \rightarrow P_1$) dostává do MPPT regulátoru, který je zapojen do LXDC boxu, který je jak silově, tak pomocí zpětné vazby propojen s termostatem – LXDC box tedy řídí jeho činnost. Pokud je sepnut a dostáváme skrz něj výkon do topné spirály, spirála předá teplo vodě.

V této bakalářské práci je především důležité, jaký má smysl celý systém. Jestli jsme schopni hospodárně využít jeho fungování a dokážeme se tak alespoň v letních měsících stát soběstačnými v oblasti ohřevu teplé vody. Na grafu (*Graf 6*), který byl vytvořen z ročních dat (*Tabulka 2*) vidíme celkovou bilanci mezi odběrem ze sítě a FV energií v závislosti na jednotlivých měsících. Oranžovou barvou je znázorněn ohřev pomocí FV energie, šedě ohřev ze sítě. K datům je také přiložena tabulka, která obsahuje hodnoty, které byly naměřeny a zhodnoceny.

Podle literatury [1] je prvotní snížení účinnosti FV panelů z krystalického křemíku odhadováno na 2 – 4 %, běžně se počítá se 3 %. Dále uvádí, že každý rok se průměrný pokles účinnosti pohybuje okolo 1% (spíše i pod mez této hodnoty). Pokles závisí na oblasti, kde je FV panel umístěn. V pouštích byl pokles výkonu za stejný časový horizont vyšší, než v chladnějších oblastech. [1]

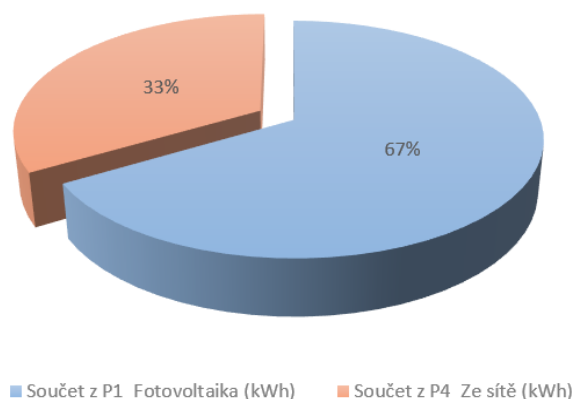
Naopak, podle informací, které byly mnou zpracovány, jsem podle výrobce Axitec solar počítal s ročním úbytkem o 0,85 %, což je přibližná interpolace poklesu výkonu v horizontu 25 let. Na obrázku je také viditelné, že i tady výrobce zohledňuje počáteční pokles výkonu o 3 %.



Obrázek 20 Znárodnění garantovaného výkonu FV panelů vyrobených firmou Axitec Solar (zdroj: axitecsolar.cz)

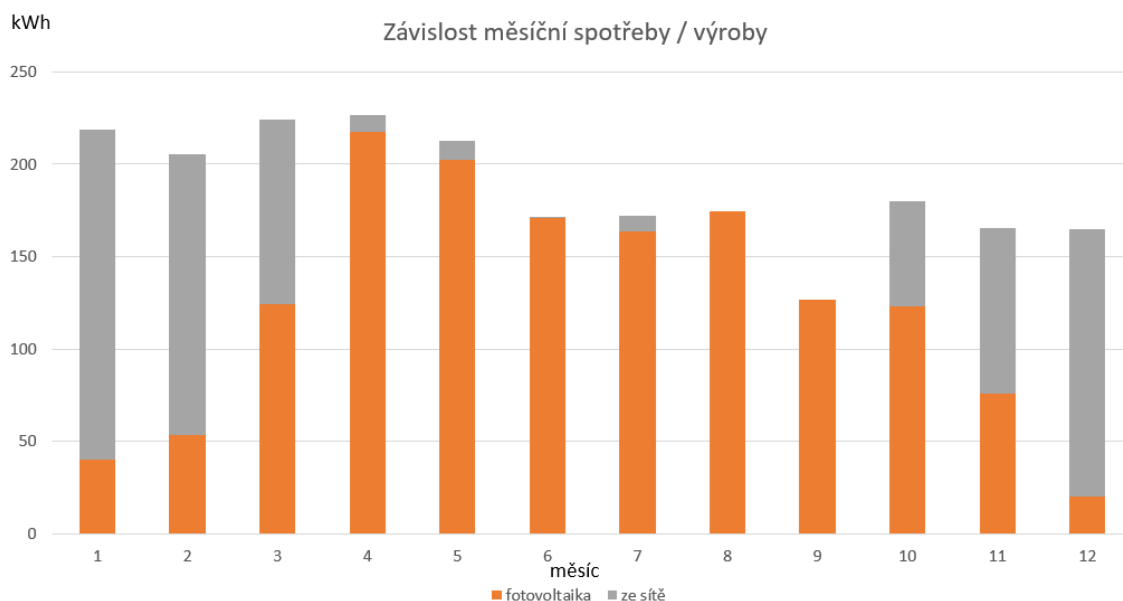
Při práci s daty bylo nejdříve zjištěno, jak FV systém funguje. Z dat, která mi byla k dispozici byly provedeny výpočty, které na začátku uvádí, jak moc je systém závislý na dohřevu ze sítě v horizontu jednoho roku. Na obrázku níže jasně vidíme, jaká je bilance mezi FV (modrá část) a sítí (oranžová část).

Roční bilance spotřeby energie bojlerem



Graf 6 Roční bilance FV systému

Z grafu je jasně patrné, že FV (modrá část) je zastoupena ve více než dvou třetinách celku, konkrétně v 66,5 procentech. Dohřev, zbylých 33,5 %, je zde podle následující tabulky víceméně pouze pro zimní měsíce, kde zastupuje v měsíčním rozložení dominantní postavení. Za povšimnutí ale také stojí výroba FV v zimních měsících, která není zcela zanedbatelná. Následující graf a tabulka znázorňují měsíční hodnoty výroby energie v kWh.



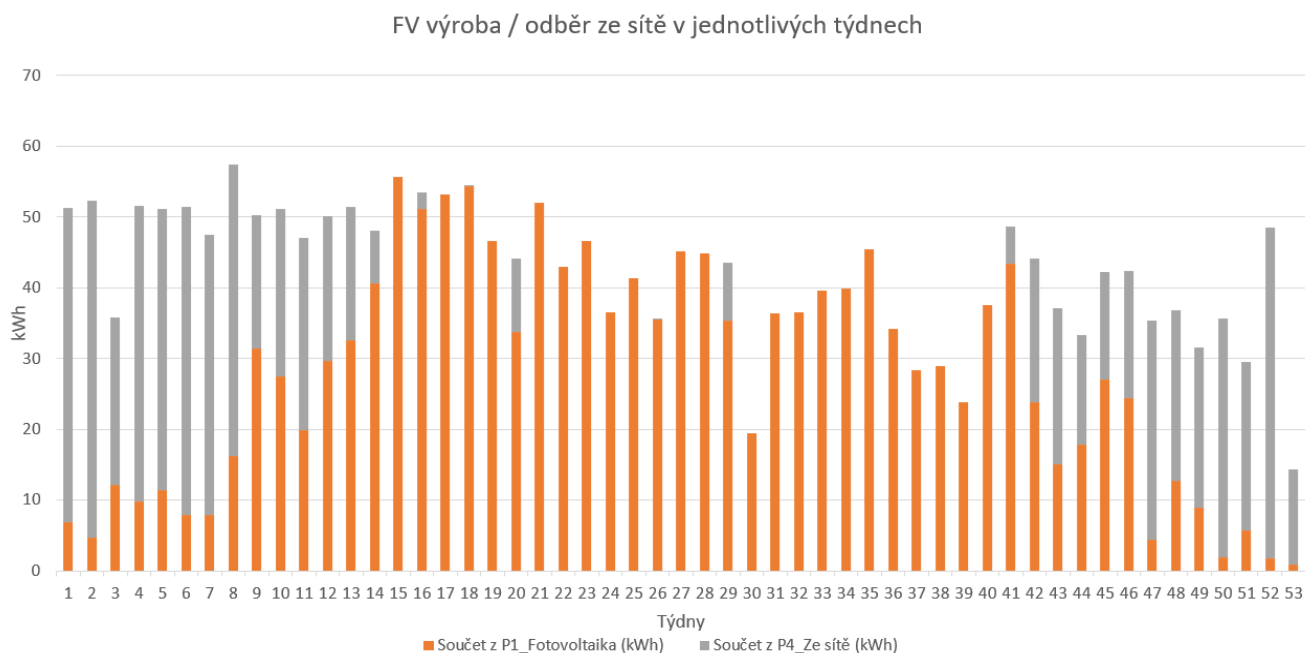
Graf 7 Znáznornění roční balance energie pro ohřev vody v jednotlivých měsících

Tabulka 2 Suma ze všech měsíčních hodnot

měsíc	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
fotovoltaika (kWh)	40,3978	53,6396	124,225	217,278	202,349	170,844	163,802	174,419	126,77	122,93	75,7958	20,1919
dohřev ze sítě (kWh)	178,566	151,757	100,075	9,6376	10,335	0,00253	8,17012	0	0	57,0656	89,9743	144,704

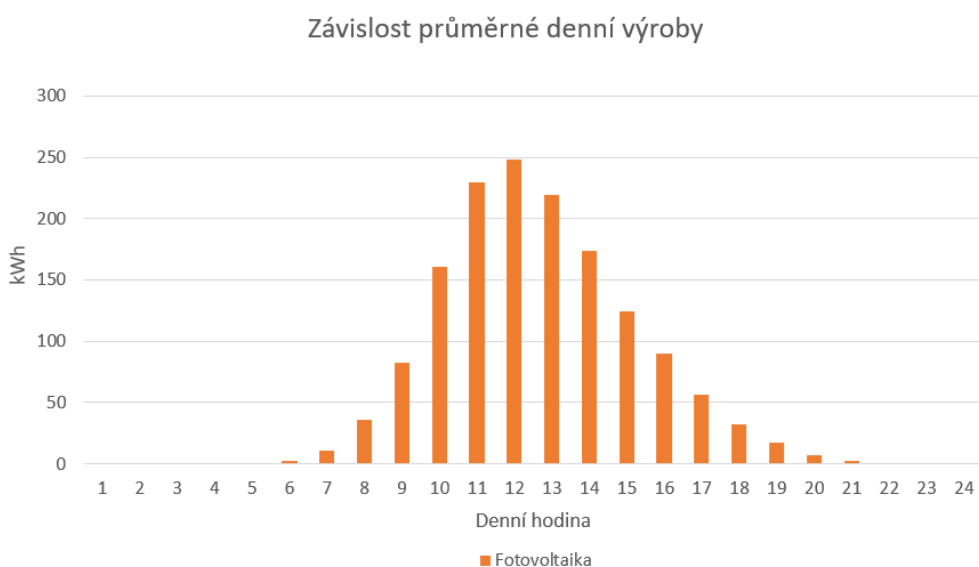
Na tabulce a předešlém grafu jasně vidíme, že fotovoltaika zaujímá větší část výroby energie pro ohřev vody. Pokud se podíváme konkrétněji, s výrobou převažuje od března až do října. V listopadu je fotovoltaika jemně pod hranicí poloviny vyrobené energie, v prosinci a lednu je pod úrovní jedné čtvrtiny, tedy pod 50 kWh a v prosinci je zaznamenáno pouze 20 kWh vyrobené energie.

Pro konkrétní určení výroby z FV a odběru z HDO je zde přiložen graf, který znázorňuje jednotlivé týdny v průběhu jednoho roku. Při bližším pohledu je zřejmé, že zhruba od 16. týdne po 41. týden je FV v podstatě soběstačná. U 30. týdne vidíme rapidní pokles odběru teplé vody z důvodu pobytu členů rodiny mimo domov, energie se tedy neměla kam uskladnit. Zcela nejnížší výroba energie z FV je v posledním týdnu, kde její hodnota činila pouze 0,9 kWh. Nejvyšší hodnotu naopak vidíme v 15. týdnu, kde je hodnota 55,7 kWh.



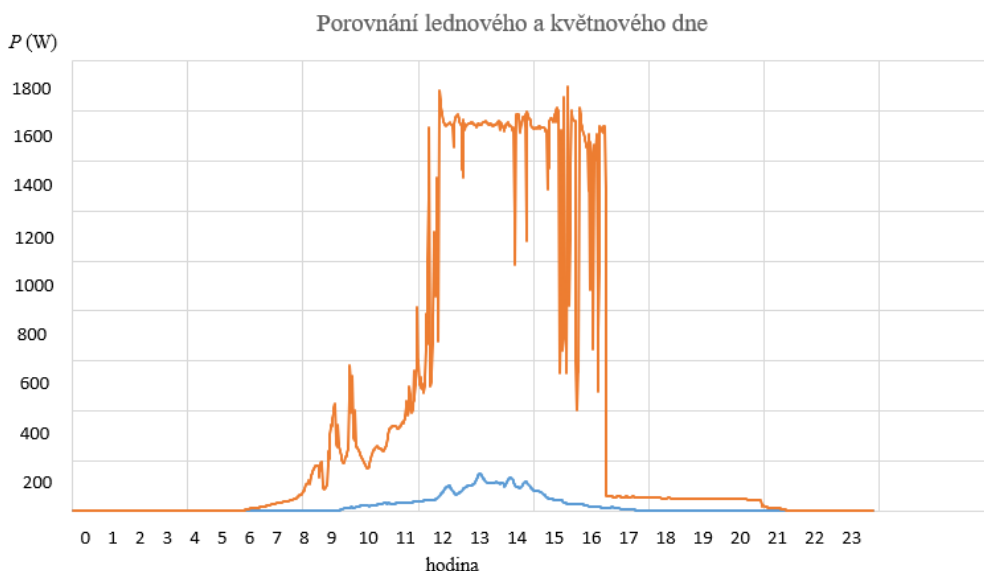
Graf 8 Znáznornění bilance energie v jednotlivých týdnech

Po předchozích bodech tedy víme, že výroba energie pomocí FV panelů značně závisí na každém měsíci, potažmo týdnu, ve kterém je vyráběna. Dalším z důležitých údajů je rozložení energie po dobu dne. Provedl jsem tedy hodinové rozložení výroby energie. Nejvyšších hodnot výroby energie je dosaženo okolo poledne. Výroba efektivně probíhá přibližně od 9. do 17. hodiny. Je to také zapříčiněno tím, že v zimních měsících se stmívá už okolo 16. hodiny (měřicí přístroje automaticky měnil zimní a letní čas), kdežto v letních měsících je tato mez posunuta ke 20. hodině. V noci, kdy slunce nesvítí, pochopitelně výroba neprobíhá.



Graf 9 Znáznornění závislosti výroby FV na denní hodině

Aby byl rozdíl ve výrobě v zimních a letních měsících více viditelný, uvedl jsem rozdíl mezi 10. lednem a 10. květnem 2018 - lednový den (modrou barvou) a květnový den (oranžovou barvou). Rozdíl ve výrobě je opravdu markantní; zatímco lednový den má maximální hodnotu ve 158 W, květnový sahá až ke hranici 1720 W.

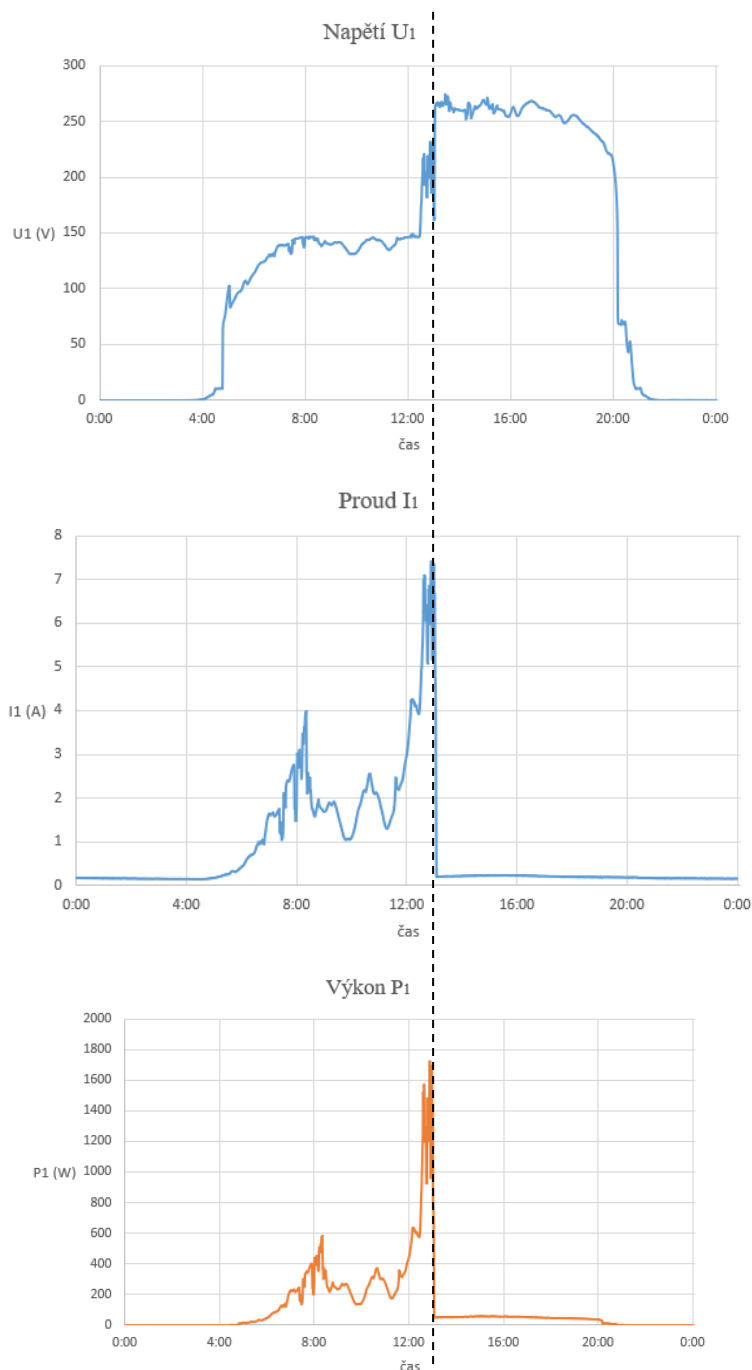


Graf 10 Závislost denní výroby na čase – srovnání lednové a květnové výroby energie

Pozn.: Ideální křivku výroby energie FV panely bohužel není možné znázornit kvůli více aspektům:

- a) Výroba je závislá na spotřebě teplé vody z bojleru – pokud se např. během dne někdo osprchuje, panely začnou znovu okamžitě produkovat energii a tím pádem by v grafu nastal propad a okamžitý vzrůst.
- b) Křivka na začátku dne vzroste a po ohřátí, či dohřátí vody v bojleru opět strmě klesne. Dokud není využita, voda v zásobníku pomalu chladne a následně je opět ohřává panely.
- c) Pokud není voda využívána vůbec, např. z důvodu delšího pobytu členů rodiny mimo domov v slunných měsících, energie se nemá kam uskladnit, a tak není splněna základní podmínka pro spotřebič. Energie se tak maří v teplo na povrchu FV panelů. Pokud uvážíme účinnost 16 %, při provozu se zbylých 84 % energie maří v teplo. Při vypnutí termostatu se stane ta situace, že veškerá energie je kompletně zmařena v teplo na povrchu FV panelů.
- d) Graf by se dal sestavit pouze v tom případě, kdy by byla voda uvnitř bojleru studená a počasí bylo dostatečně slunné. Pokud by tato práce řešila případ, kdy je FV energie odevzdávaná do sítě, pak by graf sestavit šel, vzhledem k stejnoměrné zátěži během dne.

Vytvořil jsem grafy, které popisují, jakou závislost má napětí s proudem a výkonem. Tyto grafy pochází ze 30. týdne, konkrétně 22.7. 2018 – členové rodiny byli mimo domov a energie se tak nikam neuskladňovala; od 13 hodin byla energie pouze měněna na teplo. Od rána do zlomové hodiny (zhruba 13:00) byla voda pouze dohřívána z ochladnutí přes noc z minulého dne. Za čerchovanou čarou tedy neprobíhá efektivní výroba, i když je na svorkách stále napětí.



Graf 11, 12, 13 Průběhy napětí, proudu a výkonu z datumu 22.7.2018

Pokud jsou na střeše objektu nainstalovány panely, které mohou být využity i jinak než k ohřevu vody, mohly bychom dojít k lepší návratnosti systému a energie by se tak nemařila v teplo na povrchu panelů. Proto jsem určil mezní hodnoty pro potenciální využití energie mimo systém. Vyšlo mi, že pokud by byly hodnoty nastaveny na $U_1 > 100$ V, přičemž je $P_1 < 10$ W, bylo by v roce 380 minut, kdy by se dala energie použít např. k dobíjení baterií, které by mohly teoreticky kompenzovat energii v systému, kdy je zrovna nejasné počasí. Bohužel, z několika důvodů je tento krok nevhodný:

- a) Baterie mají vysokou cenu – návratnost systému by se tak prodloužila až o roky (v závislosti na instalované kapacitě baterií a jejich ceně)
- b) Logický člen, který bude řídit nabíjení a vybíjení baterií → další náklady a prodloužení návratnosti
- c) Pokud mají být baterie nabíjeny, musí se provést zásah do systému → ukončení záruky, kterou výrobce udává
- d) Pokud v letních měsících bude neustále hezké počasí a baterie se nebudou efektivně vybíjet a nabíjet, budou degradovat. Navíc v létě je systém sám o sobě dost efektivní.
- e) Pokud by baterie měla být dobíjena, muselo by se na MPPT regulátoru upravit nastavení na nabíjení baterie (viz kapitola o MPPT regulátoru)

Proto bych osobně do systému nezasahoval, pouze konstatuji, že je teoreticky možné systém vylepšit.

6.2 Náklady, možná finanční návratnost

Podle výrobců, kteří byli zmíněni v kapitole, která se zaměřuje na komerčně dostupná zařízení, můžeme pro zjednodušení defacto všechny tyto systémy brát za parametrově stejné. Data, která jsem získal na tuto práci budou obsahovat informace od výrobce Axitec solar.

Celková energie, která je v tomto RD potřebná k ohřevu vody činí **2 242,93 kWh**;

- a) z toho **1 492,4 kWh** bylo vyprodukováno skrze fotovoltaiku.
- b) zbylá energie byla odebrána ze sítě, celkem **750,29 kWh**

Při standardní ceně energie pro rok 2019 se podle webu *elektrina.cz* pohybuje na ceně **4,73 Kč** za odběr **1 kWh**. Web tuto informaci zveřejnil 18. března 2019, je tedy velmi aktuální. [8]

Fotovoltaika tedy ročně ušetřila potenciálně **7 060 Kč**, za odběr energie ze sítě by cena v tomto případě činila **3 548 Kč**. Ročně tedy vychází ohřev vody na **10 609 Kč**. Pokud bych uvažoval, že by tato cena za kWh byla neměnná po dobu několika desítek let a zároveň bych zahrnul cenu FV systému (což činí **70 000 Kč** vč. DPH), dopočítal bych se k tomu, že se zaplatí zhruba za 10 let. To je samozřejmě špatný směr úvahy, jelikož je nutné počítat s cenou energie za nízký tarif (NT), jelikož bojler je blokován přes stykač HDO, jež zároveň ovládá počítadlo na NT odběr na elektroměru.

Při uvažování s cenou nízkého tarifu tedy bude vypadat výpočet následovně: cena **1 kWh** tedy bude činit **4,20 Kč**. Fotovoltaika by tedy vykompenzovala **6 269 Kč**; dohřev ze sítě by činil **3 151 Kč**. To ročně v sumě vychází na **9 420 Kč** pouze za ohřev vody. Pokud bych uvažoval, že by byla cena energie neměnná a panely zůstaly po celou dobu životnosti stejně účinné, poté bych vypočetl, že se systém zaplatí za přibližně 11 let a 2 měsíce. Pokud však budu uvažovat úbytek výkonu ročně o 0,85 %, což je blízko k tomu, co popisuje výrobce, návratnost bude za necelých 12 let.

Pokud dále zohledním to, že RD, který byl předmětem bakalářské práce má celoročně 20 hodin NT z důvodu elektrického vytápění, kde cena za **1 kWh** činí **2,20 Kč**, bude návratnost za necelých 24 let.

7 Shrnutí a závěr

Jako shrnutí této skutečnosti bych podotkl, že pokud bychom skutečně platili plnou cenu za tento systém a neměli bychom dotace, které mohou činit až 40 000 Kč, zároveň bychom měli elektrické vytápění a současně se nacházeli v oblasti s poměrně nízkým slunečním úhrnem, tak se tento systém příliš nevyplatí. V dalších bodech bude napsáno, jak co nejlevněji vlastnit a nejefektivněji udržovat FV systém.

- a) Využít firmy, které jsou ochotny poskytnout buďto administrativní podklady nebo rovnou odečíst dotace z celkové ceny systému – nákupní cena se může stát až poloviční, čili návratnost by byla velmi brzká, a to asi 5,5 – 6 let.
- b) Vhodné umístění objektu zaručuje vyšší úhrn slunečního záření. Jinak bude výdělečný tento systém na vysoko položených severočeských oblastech a jinak na jihu Moravy.
- c) V zimním období naklopit panely, sluneční záření tak pod lepším úhlem dopadá na panely a ty jsou tím efektivnější.
- d) Neustále kontrolovat čistotu panelů – prach, listí, nánosy nečistot atp.
- e) Efektivně využívat teplou vodu – v letních měsících obzvlášť
- f) V letních měsících úplně vypínat dohřev ze sítě, pokud se vyloženě neschyluje ke špatnému počasí, které by přetrvávalo po dlouhou dobu.
- g) Baterie nejsou podle předešlých připomínek příliš vhodným doplňkem k zefektivnění, nicméně, pokud někdo vlastní např. zabezpečovací systém s náhradním 12 V zdrojem, dobíjet by se tímto způsobem rozhodně dal.

Závěrem bych dodal, že práce pro mě byla velmi přínosná a zajímavá. Fotovoltaika je rozhodně v posledních letech zdaleka na jiné úrovni, než tomu bylo před lety. Ve slunci a obecně v alternativních zdrojích je podle mého názoru ukryto mnohem více energie, než je ta, kterou skutečně dokážeme z těchto zdrojů převést na elektrickou. Pokud by existoval způsob, jak bychom dokázali zachytit panely více krátkovlnného a především dlouhovlnného záření, byla by fotovoltaika mnohem účinnější. Fotovoltaický ohřev vody je nepochybně vynikající nápad a pokud bychom využili předešlých bodů a hlavně bychom byli schopni získat dotace, které výrazně ovlivní konečnou cenu za systém, velmi významně by ulehčil každodennímu rodinnému rozpočtu a v neposlední řadě také životnímu prostředí. Po shrnutí veškerých dat a zpracování mnoha informací ohledně tohoto systému bych jej rozhodně doporučil a osobně bych jej i sám chtěl vlastnit.

8 Seznam literatury a webových stránek

Literatura:

- [1] MIŠÁK, Stanislav a Lukáš PROKOP. *Provozní vlastnosti obnovitelných zdrojů*. Ostrava: Asociace technických diagnostiků ČR, o.s., 2014. ISBN 978-80-260-6184-7.
- [2] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [3] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika: elektřina ze slunce*. 2. vyd. Praha: EkoWATT, 2008. 21. století. ISBN 978-80-7366-133-5.

Webové stránky:

- [4] *Energy informative* [online]. California: Energy informative, 2014 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://energyinformative.org/amorphous-silicon-solar-panels/>
- [5] *Tzb info* [online]. Brno: Eicero, 2018 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>
- [6] *Moje fotovoltaika* [online]. Písek: Sun Pi, 2018 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://mojefotovoltaika.cz/_files/200000042-722e873274/Datový%20list%20Sun%20Heat%20DC-AC%20MPPT.pdf
- [7] *Solar electric* [online]. Flagstaff: Northern Arizona Wind & Sun, 2019 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.solar-electric.com/learning-center/batteries-and-charging/mppt-solar-charge-controllers.html>
- [8] *Elektrina.cz* [online]. Praha: Usetreno.cz, 2019 [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: https://www.elektrina.cz/srovnani-cen-elektriny?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=elektrina&utm_campaign=SE_elektrina_cz_frazova_modifikovana&gclid=Cj0KCQjwnpXmBRDUARIsAEo71tTOz7gkD8fP5tYv3nMW60Jig4ST1ESMVr_XN1KogoJUc4m-EnBGNkaAvI5EALw_wcB